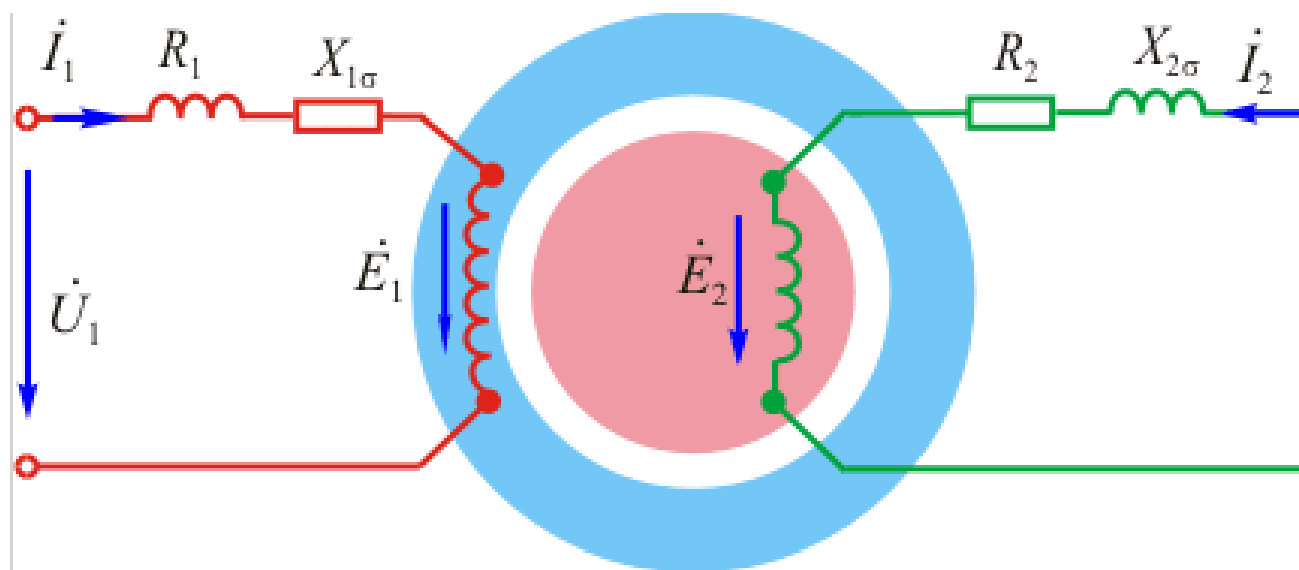


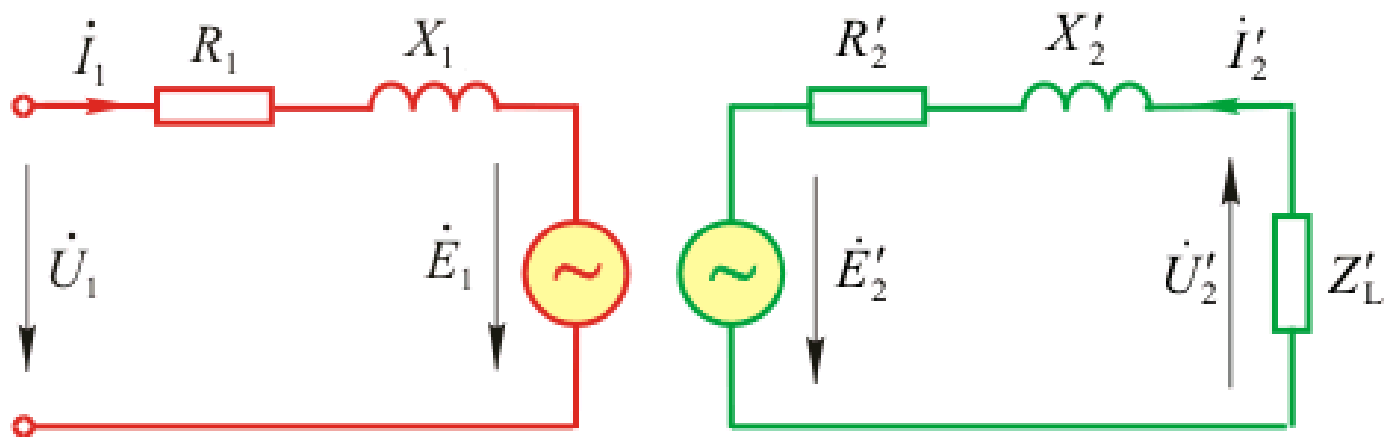
## 等效电路和相量图是电机分析的基本工具

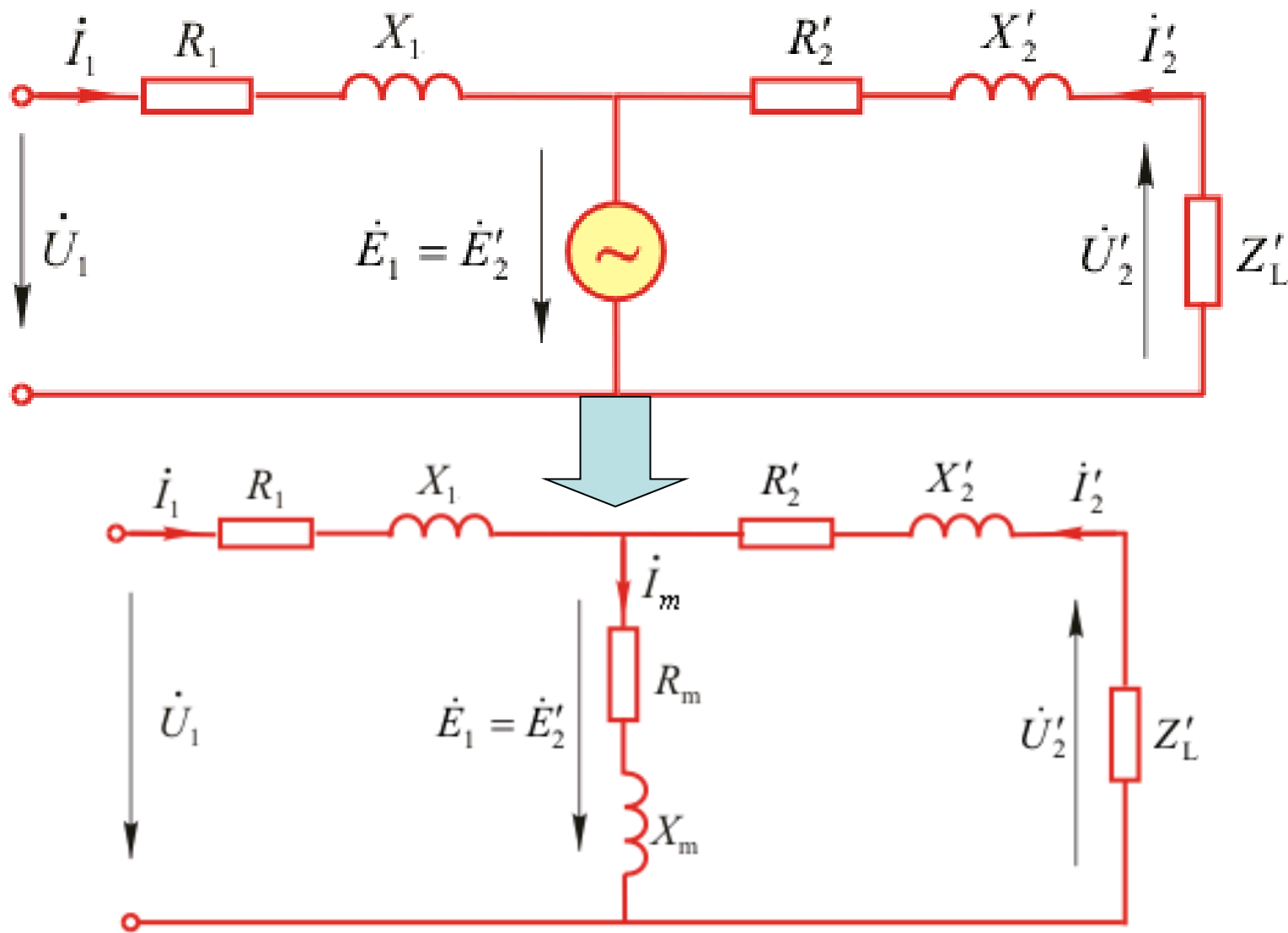
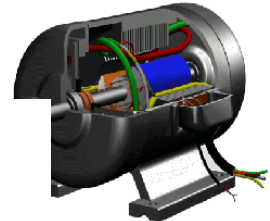
让我们回顾一下变压器和异步电机的等效电路是如何得到的？





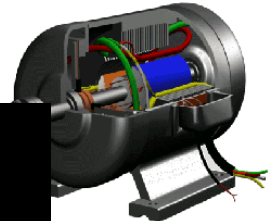
转子静止时的等效电路





绕组在电路中如何表示？



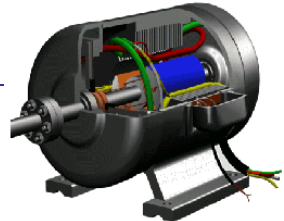


$$\left. \begin{array}{l} i_f \rightarrow \vec{F}_{f1} \\ I \rightarrow \vec{F}_a \end{array} \right\} \Rightarrow \vec{F}_{f1} + \vec{F}_a = \vec{F}_\delta \rightarrow \vec{B}_\delta \rightarrow \dot{E}_\delta$$

$$\begin{array}{l} i_f \rightarrow \vec{F}_{f1} \xrightarrow{\text{非线性}} \vec{B}_0 \\ I \rightarrow \vec{F}_a \xrightarrow{\text{非线性}} \vec{B}_a \end{array} \quad \vec{F}_\delta \xrightarrow{\text{非线性}} \vec{B}_\delta \Rightarrow \dot{B}_\delta \neq \dot{B}_0 + \dot{B}_a$$

$$\dot{E}_\delta \neq \dot{E}_0 + \dot{E}_a$$





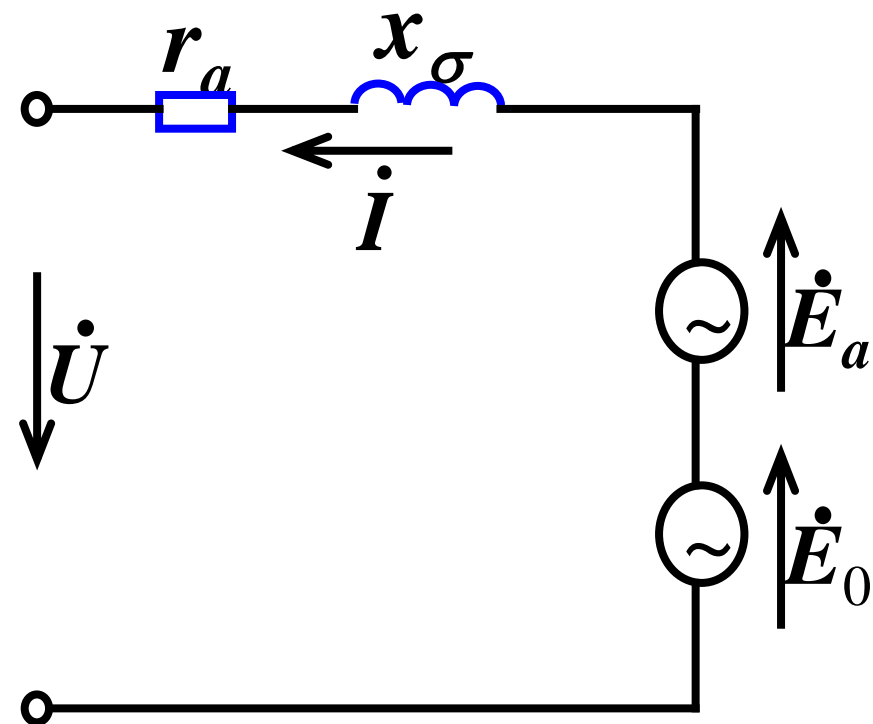
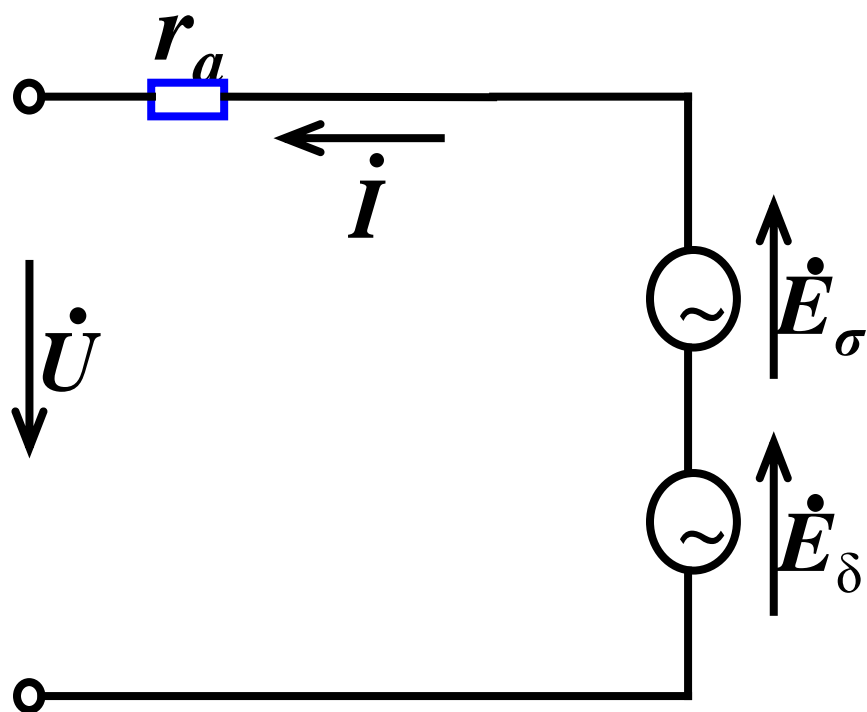
## • 同步电机中

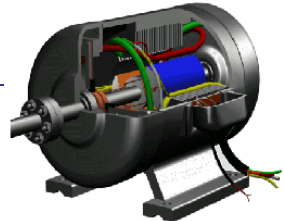
- 不考虑磁路饱和，可应用叠加原理
- 转子磁场与电枢磁场分别在定子绕组中感应电势
- 转子磁场感应的电势称为空载电势，用  $E_0$  表示
- 电枢磁场感应的电势称为电枢反应电势，用  $E_a$  表示

$$\begin{cases} \bar{B}_\delta = \bar{B}_0 + \bar{B}_a \\ \dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_a \end{cases}$$

- 电枢磁场和转子磁场都是和转子转速一致，不会在转子绕组中感应出电势，从电路的角度来看，要比变压器及异步电机更为简单







$$\dot{\mathbf{E}} = \dot{\mathbf{E}}_0 + \dot{\mathbf{E}}_a = \dot{\mathbf{U}} + \dot{\mathbf{I}}(\mathbf{r}_a + \mathbf{j}x_\sigma)$$

式中  $\dot{E}$  ——合成电势；

$\dot{U}$  ——定子绕组的端电压；

$i$  ——定子电流；

$r_a$  ——定子绕组的电阻；

$x_\sigma$  ——定子绕组的漏抗。

均为  
每相  
值





- 电枢反应电抗和同步电抗
  - 不考虑电枢磁势的谐波分量，其基波分量为

$$F_a = \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \sqrt{2} s q k_{w1} I_c$$

或

$$F_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \frac{N}{p} k_{w1} I$$

- 则电枢磁势在气隙中产生的基波磁场振幅为

$$B_a = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} F_a = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \frac{N}{p} k_{w1} I$$







每极电枢磁通为

$$\Phi_a = \frac{2}{\pi} B_a l \tau$$

电枢磁通截切定子绕组时，在每相绕组中的感应的电势为电枢反应电势，即

$$E_a = \sqrt{2} \pi f k_{w1} N \Phi_a$$





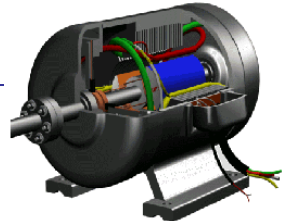
加以整理后得

$$E_a = \left( \frac{4 \mu_0 m f N^2 k_{w1}^2 \tau l}{\pi p k_\delta \delta} \right) I$$

$x_a$

电枢反应电势与负载电流成正比，它们之间的比例常数称为电枢反应电抗 $x_a$





电枢反应电势  $\dot{E}_a$  将较  $\dot{\phi}_a$  滞后  $90^\circ$ ,

亦即将较  $\dot{I}$  滞后  $90^\circ$ , 故用复数表示时

$$\dot{E}_a = -j\dot{I}x_a$$

### • 电枢反应电抗物理意义

- 电枢反应磁场  $\dot{F}_a$  在定子每相绕组中所感应的电枢反应电势  $\dot{E}_a$ ，可以把它看作相电流所产生的一个电抗电压降  $x_a$
- 这个电抗便是电枢反应电抗





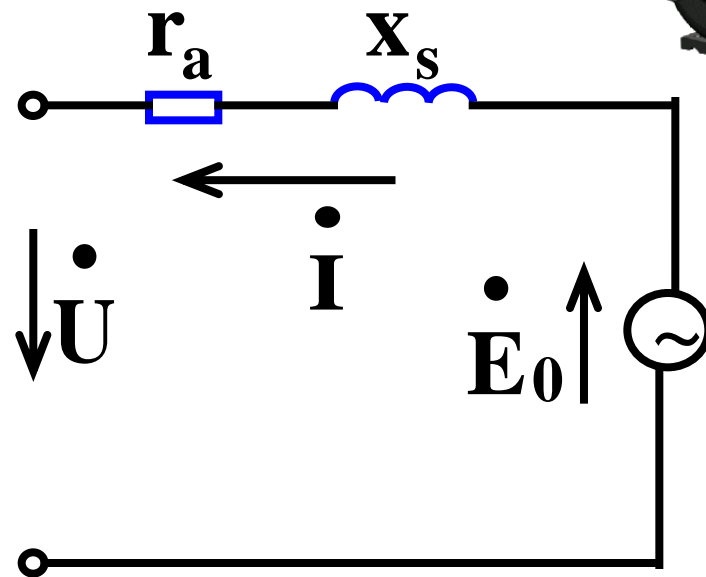
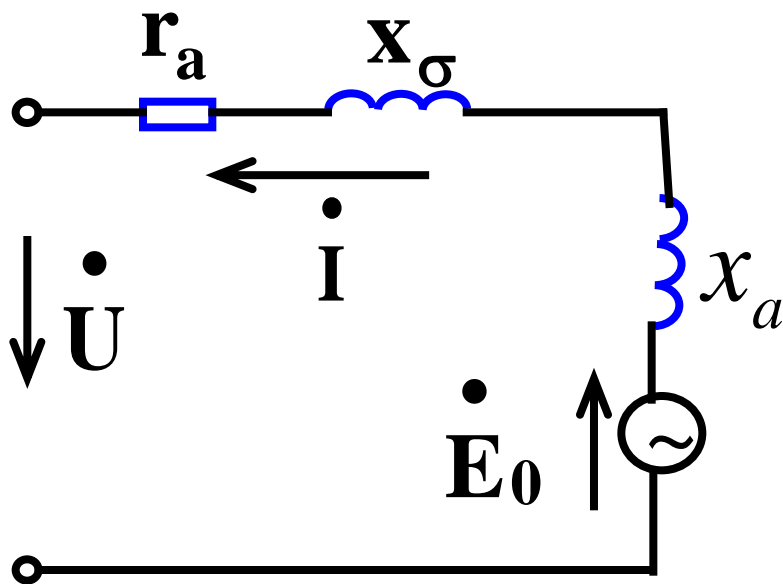
把  $x_a$  和  $x_\sigma$  合并为一个电抗  $x_s$ ，则

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{E}}_0 &= \dot{\mathbf{U}} + \dot{\mathbf{I}}[\mathbf{r}_a + \mathbf{j}(x_a + x_\sigma)] \\ &= \dot{\mathbf{U}} + \dot{\mathbf{I}}(\mathbf{r}_a + \mathbf{j}x_s) \\ &= \dot{\mathbf{U}} + \dot{\mathbf{I}}\mathbf{Z}_s\end{aligned}$$

$X_s$ : 同步电抗

- 一部分对应于定子电流所产生的磁通
- 另一部分对应于定子绕组的漏磁通





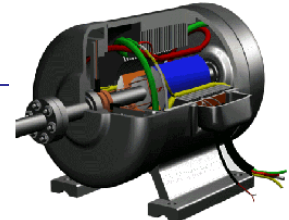
- 同步电抗

- 同步阻抗

$$\mathbf{X}_s = \mathbf{X}_a + \mathbf{X}_\sigma$$

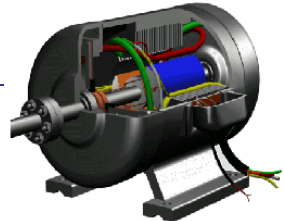
$$\mathbf{Z}_s = \mathbf{r}_a + \mathbf{j}\mathbf{X}_s$$





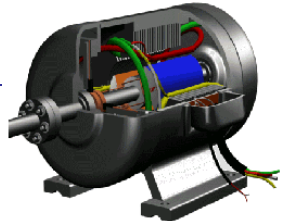
- 同步电抗是同步电机的重要参数
  - $X_\sigma$  对应漏磁通
  - $X_a$  对应定子电流产生的磁通
- 实用上，不将两者分开
  - 计算性能时只用到同步电抗
  - 测量时也只能测量到同步电抗
- 同步电抗的大小
  - $X_\sigma$  很小，  $X_s \approx X_a$
- 与异步机的  $X_m$  比较
  - 性质相仿，都对应于三相电流产生的旋转磁场
  - 同步机气隙大，  $X_s < X_m$
  - 三相对称，各相同步电抗相等





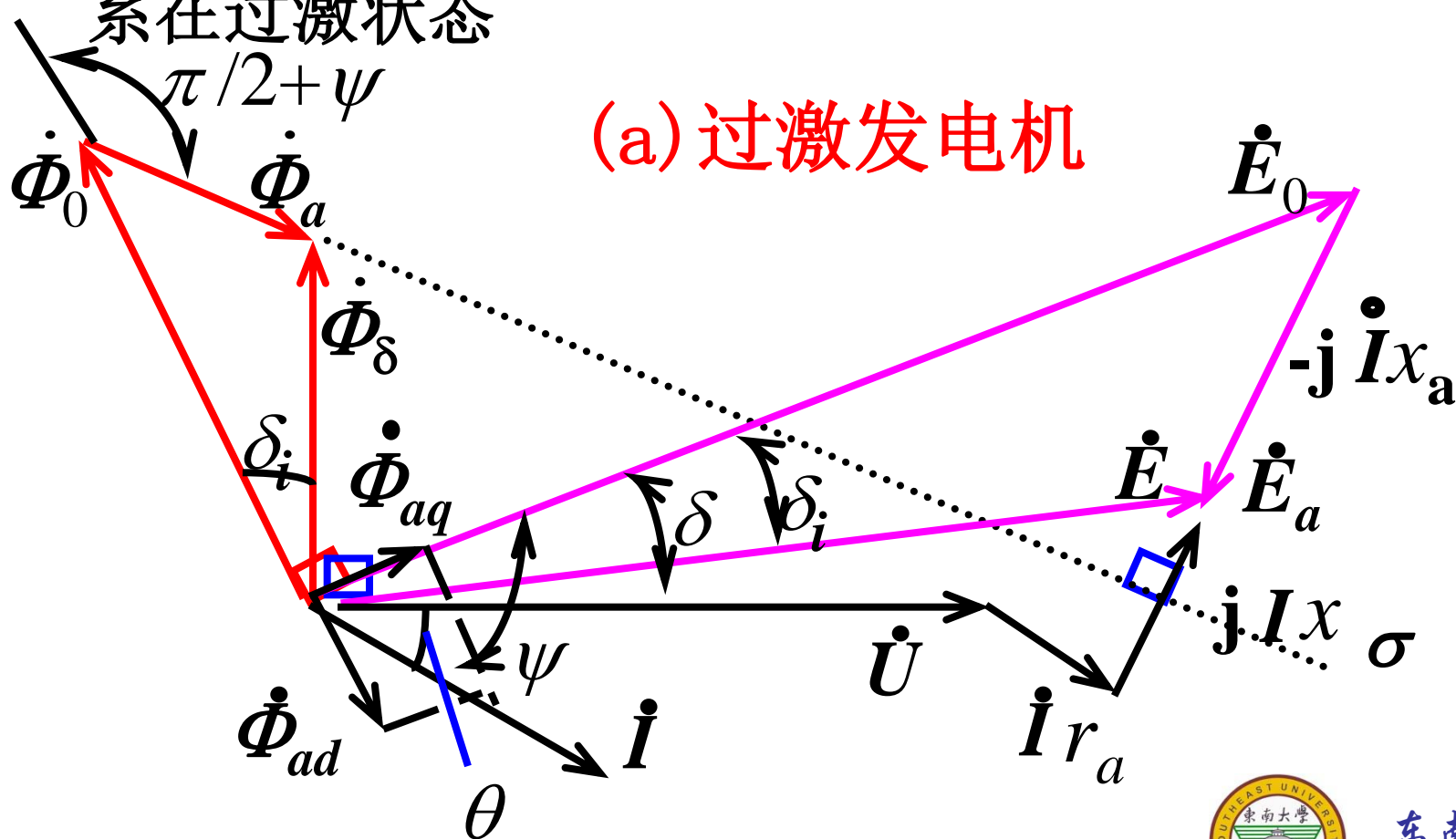
- 同步电抗与转子绕组没有关系
  - 因为没有相对运动
- 但转子仍是定子磁场的磁路的一部分
  - 若抽去转子，从定子侧测得的电抗为  $x_\sigma$ ，而不是  $x_s$
- 只有当定子流过**对称电流**时，亦即只有当空气隙磁场为**圆形旋转磁场**时，**同步电抗才有意义**
- 当定子绕组中流过**不对称三相电流**时，**不能无条件地应用同步电抗**





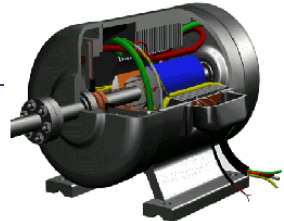
# 隐极发电机的相量图

- 图 (a) 表示当负载电流  $\dot{I}$  滞后于空载电势  $\dot{E}_0$ ，即当  $0 < \psi < \pi/2$  时的情况，该发电机系在过激状态







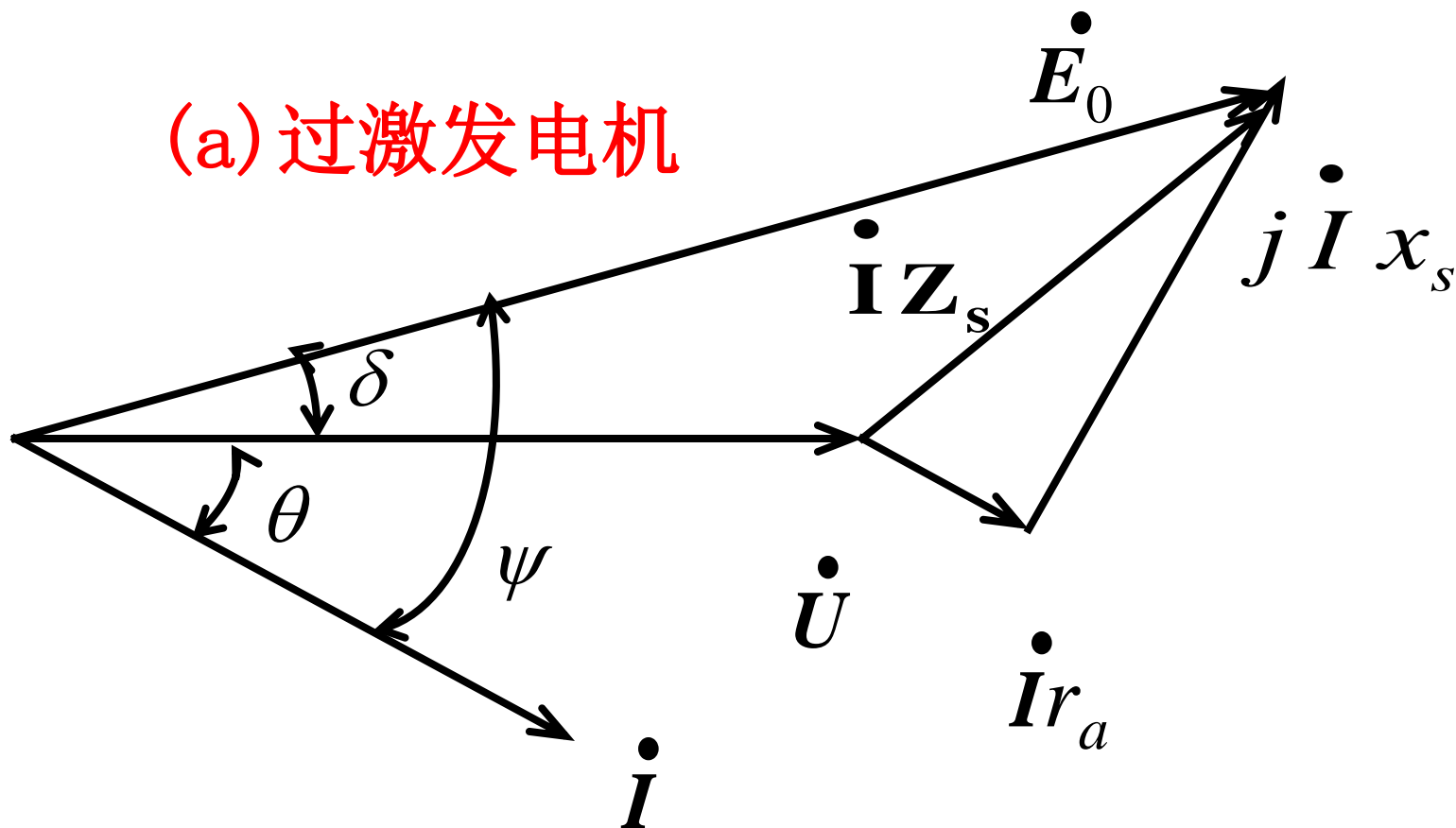


- 功角  $\delta$ 
  - $\dot{\mathbf{E}}_0$  与  $\dot{\mathbf{U}}$  之间的相位角为  $\delta$ ，在分析同步电机功率时很重要
- 位移角  $\delta_i$ 
  - 定义  $\dot{\mathbf{E}}_0$  与  $\dot{\mathbf{E}}$  之间的相位角为  $\delta_i$
  - $\delta_i$  反映负载后磁势的位移
- $\delta \approx \delta_i$ 
  - 实用上认为两者相等不加区别



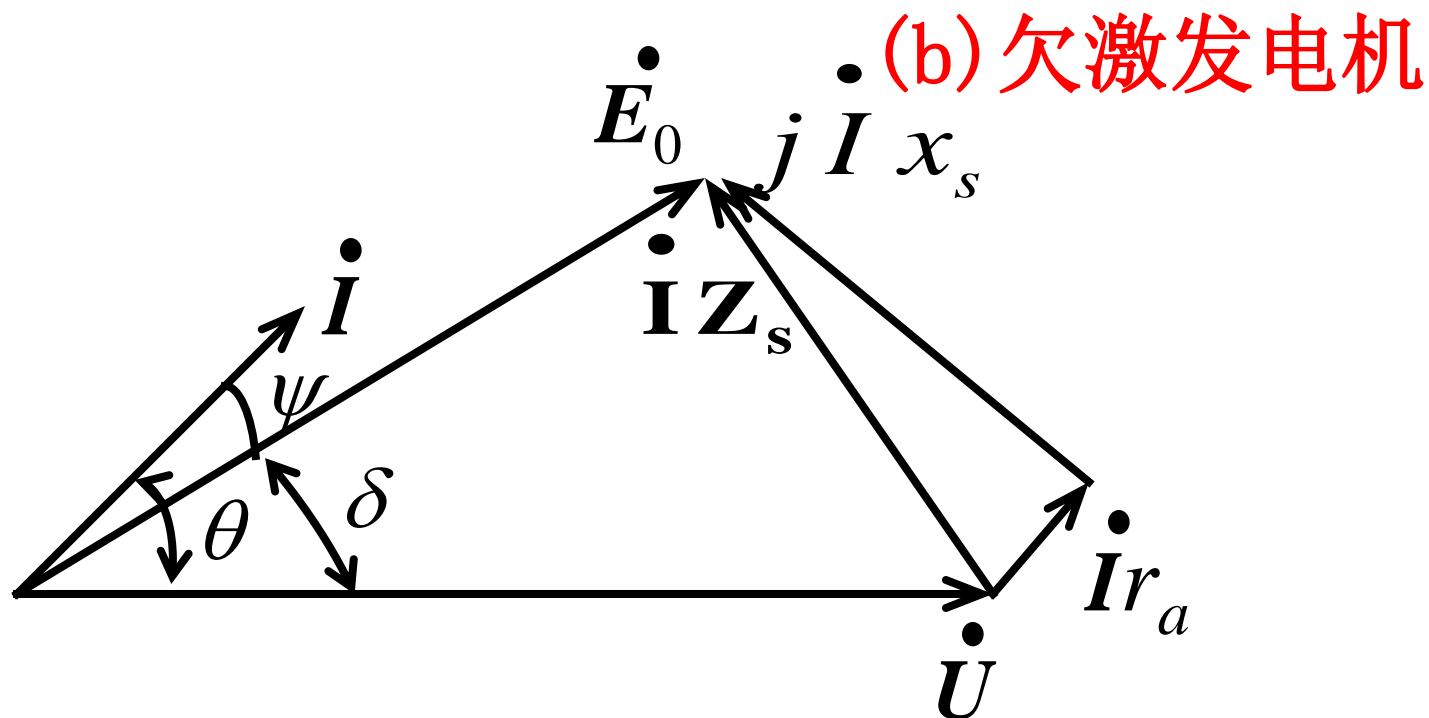


(a) 过激发电机



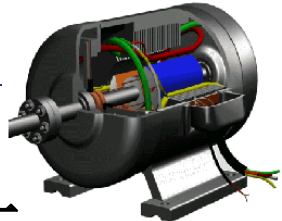
隐极同步发电机的简化相量图





隐极同步发电机的简化相量图



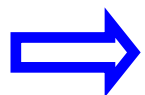


# 考虑磁路饱和时隐同步电机的分析方法

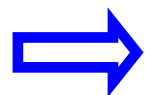
磁路饱和时，由于磁路的非线性，叠加原理便不再适用。

$$\Phi_{\delta} \neq \Phi_0 + \Phi_a, \quad E_{\delta} \neq E_0 + E_a$$

转子磁势

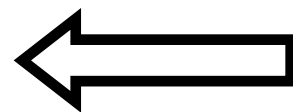


转子磁场



转子磁场  
感应电势

合成  
感应电势



+

电枢磁势



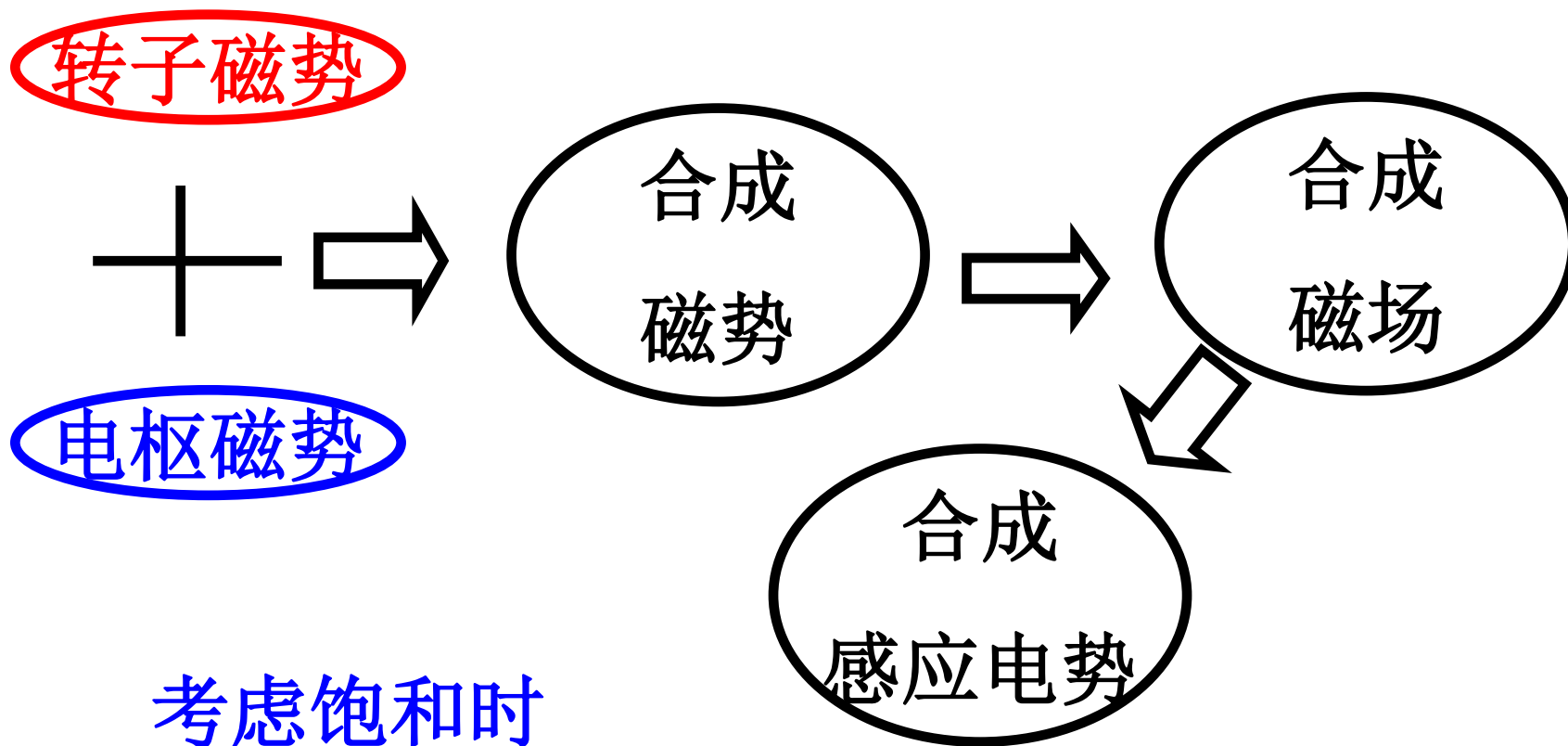
电枢磁场

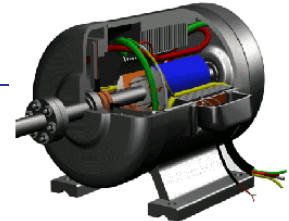


电枢磁场  
感应电势

不考虑饱和时

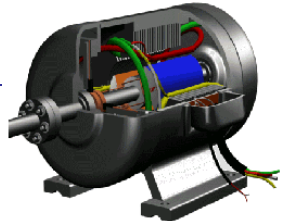






- 先求出作用在主磁路上的合成气隙磁动势
- 利用电机磁化曲线求出负载时的气隙磁通及相应的空载电动势
- 从空载电动势减去电枢绕组的电阻和漏抗压降
- 得出电枢的端电压

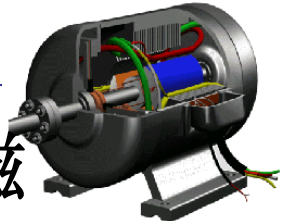




- 凸极同步电机的磁路特点
  - 气隙不均匀，气隙各处的磁阻不相同
  - 极面下的磁导大，两极之间的磁导小，二者相差甚大
- 分析凸极同步电机电枢反应时
  - 难以从电枢磁势波  $F_a$  求电枢磁通  $\Phi_a$
  - 同一电枢磁势波作用在气隙不同处，会遇到不同的磁阻
    - 在分析电枢反应时，不仅要知道电枢磁势的大小和空间位置，还必须找出该空间位置处的磁阻，才能求出电枢磁通密度





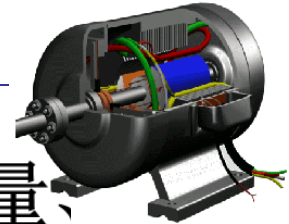


- 当电机气隙不均匀时，求空气隙各点处的磁阻又是非常困难的
- 为了解决这个困难，采用了双反应法

## • 双反应法

- 分解电枢基波磁势 $F_a$ 
  - 直轴上的直轴电枢反应磁势 $F_{ad}$
  - 交轴上的交轴电枢反应磁势 $F_{aq}$
- 直轴磁导和交轴磁导虽不相等，但它们本身却都有固定的数值

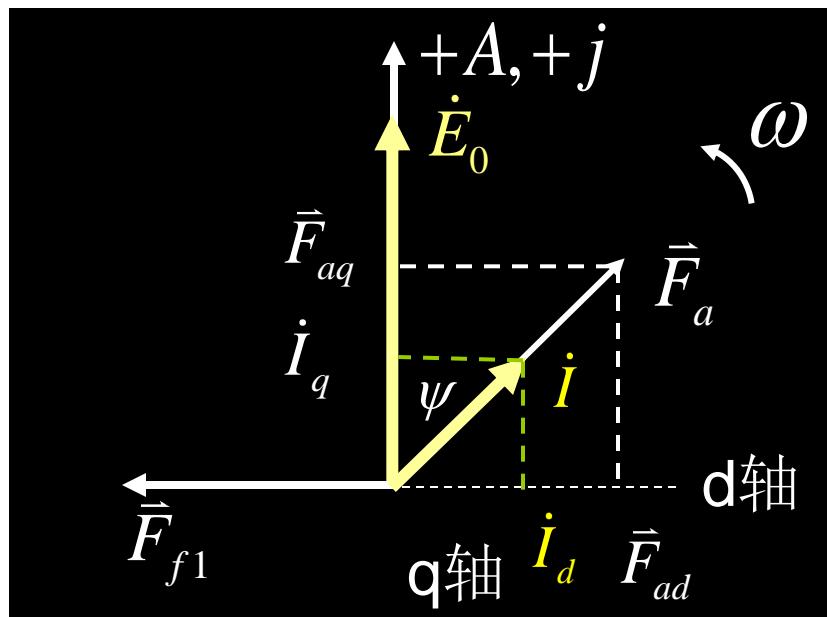


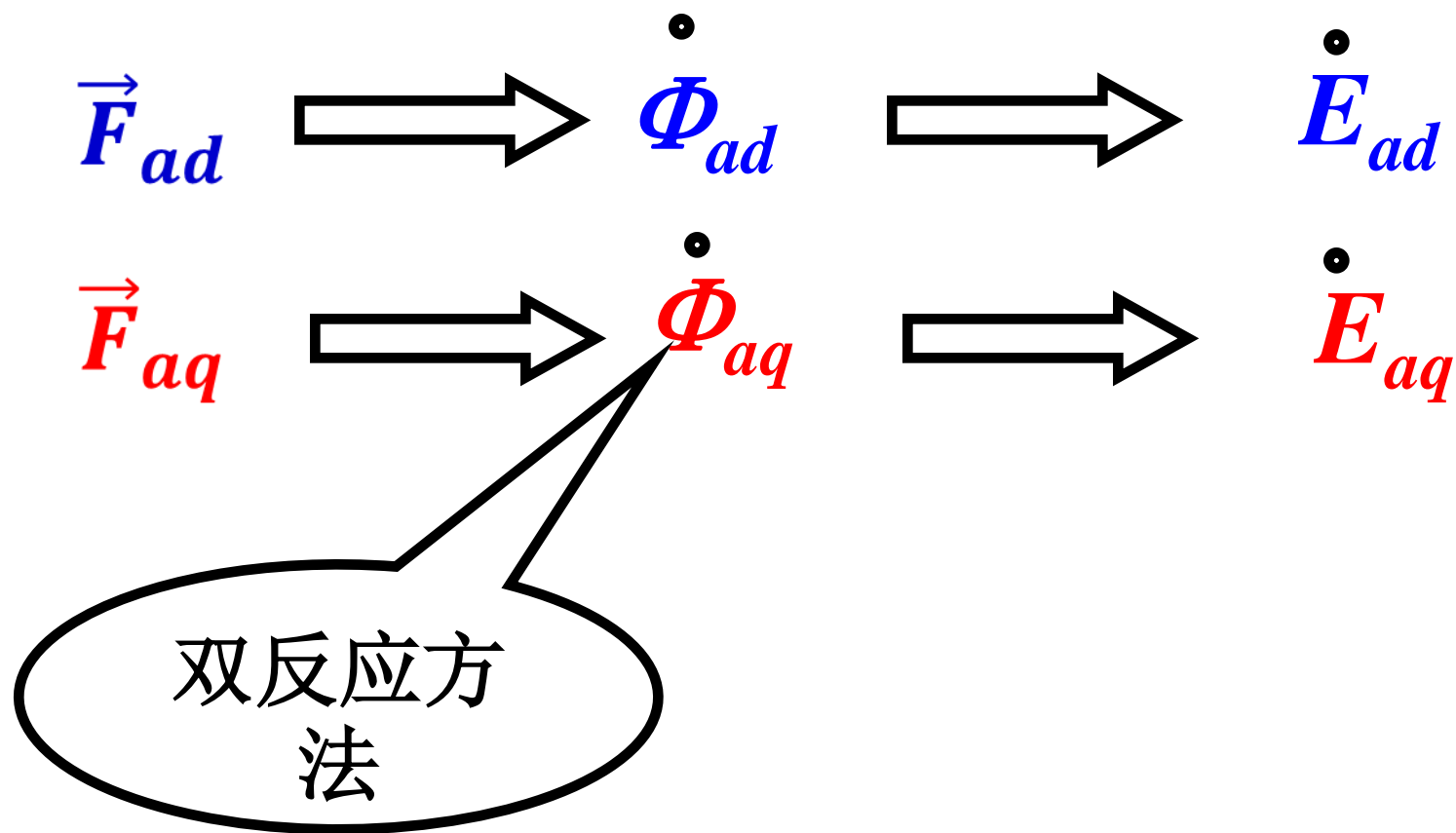


- 这种把电枢反应  $\vec{F}_a$ ，用两个电枢反应分量、 $\vec{F}_{ad}$ 和 $\vec{F}_{aq}$ 来替代的方法称为双反应法

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_{ad} &= \vec{F}_a \sin \psi \\ \vec{F}_{aq} &= \vec{F}_a \cos \psi \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_d &= \dot{I} \sin \psi \\ \dot{I}_q &= \dot{I} \cos \psi \end{aligned} \right\}$$

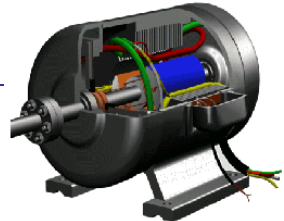






- 双反应法是建立在叠加原理的基础上，当不计饱和时，应用双反应法来分析凸极同步电机既方便又准确
- 虽然直轴和交轴电枢反应磁势 $F_{ad}$ 和 $F_{aq}$ 都是正弦分布波但由于气隙不均匀它们所产生的空间磁通密度分布波 $B_{ad}$ 和 $B_{aq}$ 和磁势波不同





# 不计磁路饱和时 凸极同步发电机分析方法

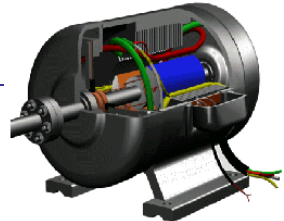
- 电路方程和等效电路
  - 定子绕组的电压平衡式

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} = \dot{U} + \dot{I}(r_a + jX_\sigma)$$

$$\left. \begin{array}{l} I_f \rightarrow F_f \rightarrow F_{f1} \rightarrow \dot{\Phi}_0 \rightarrow \dot{E}_0 \\ \dot{I} \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \dot{I}_d \rightarrow F_{ad} \rightarrow \dot{\Phi}_{ad} \rightarrow \dot{E}_{ad} \\ \rightarrow \dot{I}_q \rightarrow F_{aq} \rightarrow \dot{\Phi}_{aq} \rightarrow \dot{E}_{aq} \end{array} \right\} \end{array} \right\} \rightarrow \dot{E}_\delta$$

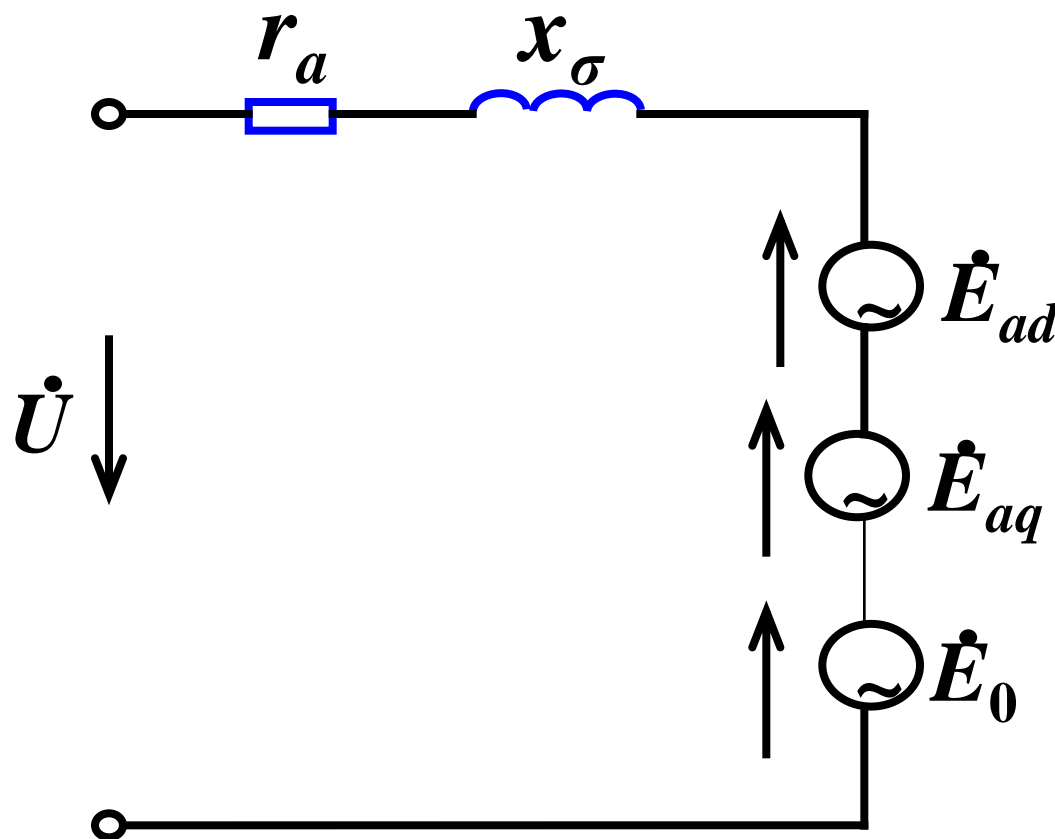
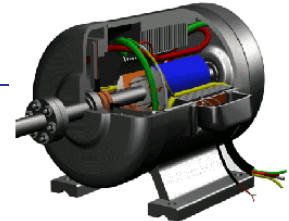
$$\downarrow \rightarrow \quad \rightarrow \dot{\Phi}_\sigma \rightarrow \dot{E}_\sigma$$





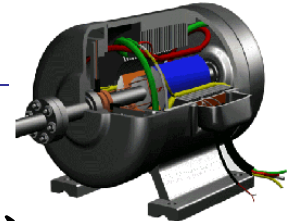
式中	$\dot{E}$	——合成电势；
	$\dot{U}$	——定子绕组的端电压；
	$\dot{E}_{ad}$	——直轴电枢反应电势；
	$\dot{E}_{aq}$	——交轴电枢反应电势；
	$\dot{I}$	——定子电流；
	$r_a$	——定子绕组的电阻；
	$X_\sigma$	——定子绕组的电抗。





凸极同步发电机的等效电路





## • 直轴电枢反应电抗

- 电枢电流直轴分量  $I_d$  产生直轴电枢反应磁势  $f_{ad}$ ，其基波振幅为

$$F_{ad} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \frac{N}{p} k_{w1} I_d$$

- $f_{ad}$  所产生的磁通密度  $B_{ad}$

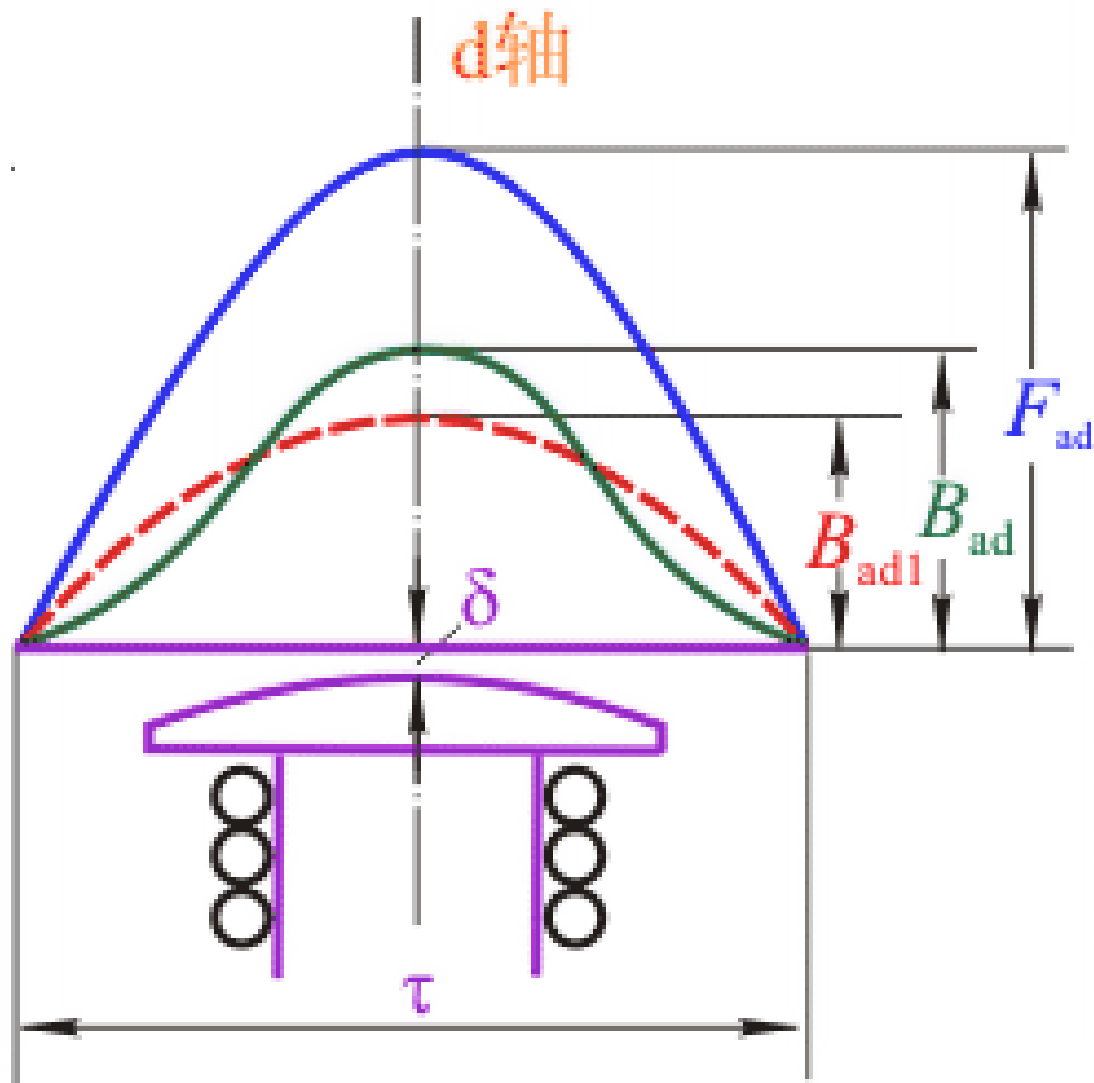
$$B_{ad} = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} F_{ad}$$

- 其基波为  $B_{ad1} = k_d B_{ad}$

$k_d$  称为直轴电枢磁通密度分布曲线的波形系数







电枢磁动势作用于d轴





-  $\Phi_{ad1}$  感应出直轴电枢反应电势为

$$E_{ad} = \sqrt{2} \pi f N k_{w1} \Phi_{ad1}$$

- 而

$$\begin{aligned} \Phi_{ad1} &= \frac{2}{\pi} B_{ad1} l \tau \\ &= \frac{2}{\pi} k_d \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \frac{N}{p} k_{w1} \tau l I_d \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} \frac{\mu_0 m N k_{w1} \tau l k_d}{p k_\delta \delta} I_d \end{aligned}$$





— 整理得

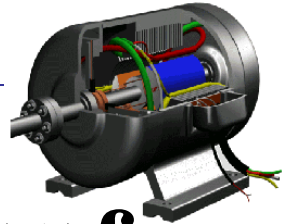
$$E_{ad} = \left( \frac{4 \mu_0 m f N^2 k_{w1}^2 l \tau k_d}{\pi p k_\delta \delta} \right) I_d = x_{ad} I_d$$

—  $x_{ad}$  — 直轴电枢反应电抗

$E_{ad}$  滞后  $\Phi_{ad1}$   $90^\circ$ , 亦即滞后  $I_d$   $90^\circ$

$$\dot{E}_{ad} = -j \dot{I}_d x_{ad}$$





- 交轴电枢反应电抗

- 电枢电流交轴分量  $I_q$  产生交轴电枢反应磁势  $f_{aq}$

$$F_{aq} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \frac{N}{p} k_{w1} I_q$$

- $f_{aq}$  所产生的磁通密度  $B_{aq}$

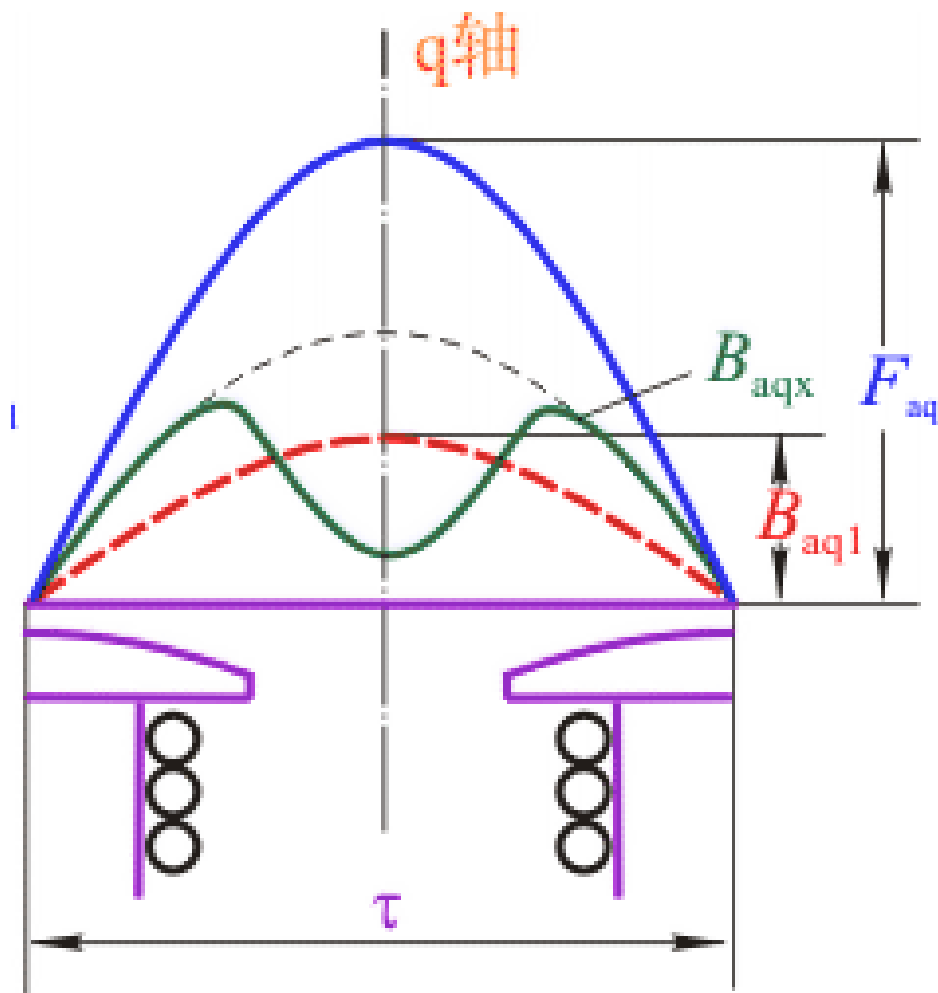
$$B_{aq} = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} F_{aq}$$

- 其基波为

$$B_{aq1} = k_q B_{aq}$$

- $k_q$  称为交轴电枢磁通密度分布曲线的波形系数





电枢磁磁动势作用于q轴





–  $\Phi_{aq1}$  感应出交轴电枢反应电势为

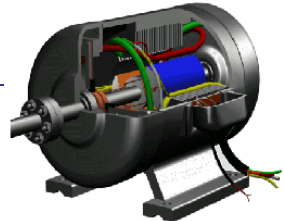
$$E_{aq} = \sqrt{2} \pi f N k_{w1} \Phi_{aq1}$$

– 整理得

$$E_{aq} = \left( \frac{4 \mu_0 m f N^2 k_{w1}^2 l \tau k_q}{\pi p k_\delta \delta} \right) I_q = x_{aq} I_q$$

–  $x_{aq}$  —— 交轴电枢反应电抗





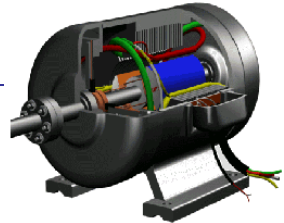
- 直轴同步电抗和交轴同步电抗
  - $x_\sigma$  设为定子每相漏抗，把漏抗与电枢反应电抗合并，即

$$\mathbf{X}_d = \mathbf{X}_\sigma + \mathbf{X}_{ad}$$

$$\mathbf{X}_q = \mathbf{X}_\sigma + \mathbf{X}_{aq}$$

- $x_d$ ，直轴同步电抗
- $x_q$ ，交轴同步电抗





- 凸极同步发电机的相量图
  - 将电枢反应电势看作是电抗压降

$$\dot{E}_0 - j\dot{I}_d x_{ad} - j\dot{I}_q x_{aq} = \dot{U} + \dot{I}(r_a + jx_\sigma)$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}r_a + j\dot{I}_d(x_\sigma + x_{ad}) + j\dot{I}_q(x_\sigma + x_{aq})$$

$$= \dot{U} + j\dot{I}r_a + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q$$

- 隐极同步电机是凸极同步电机的特例
  - 隐极机的气隙均匀

$$k_d = k_q = 1, x_{ad} = x_{aq} = x_a, x_d = x_q = x_s$$







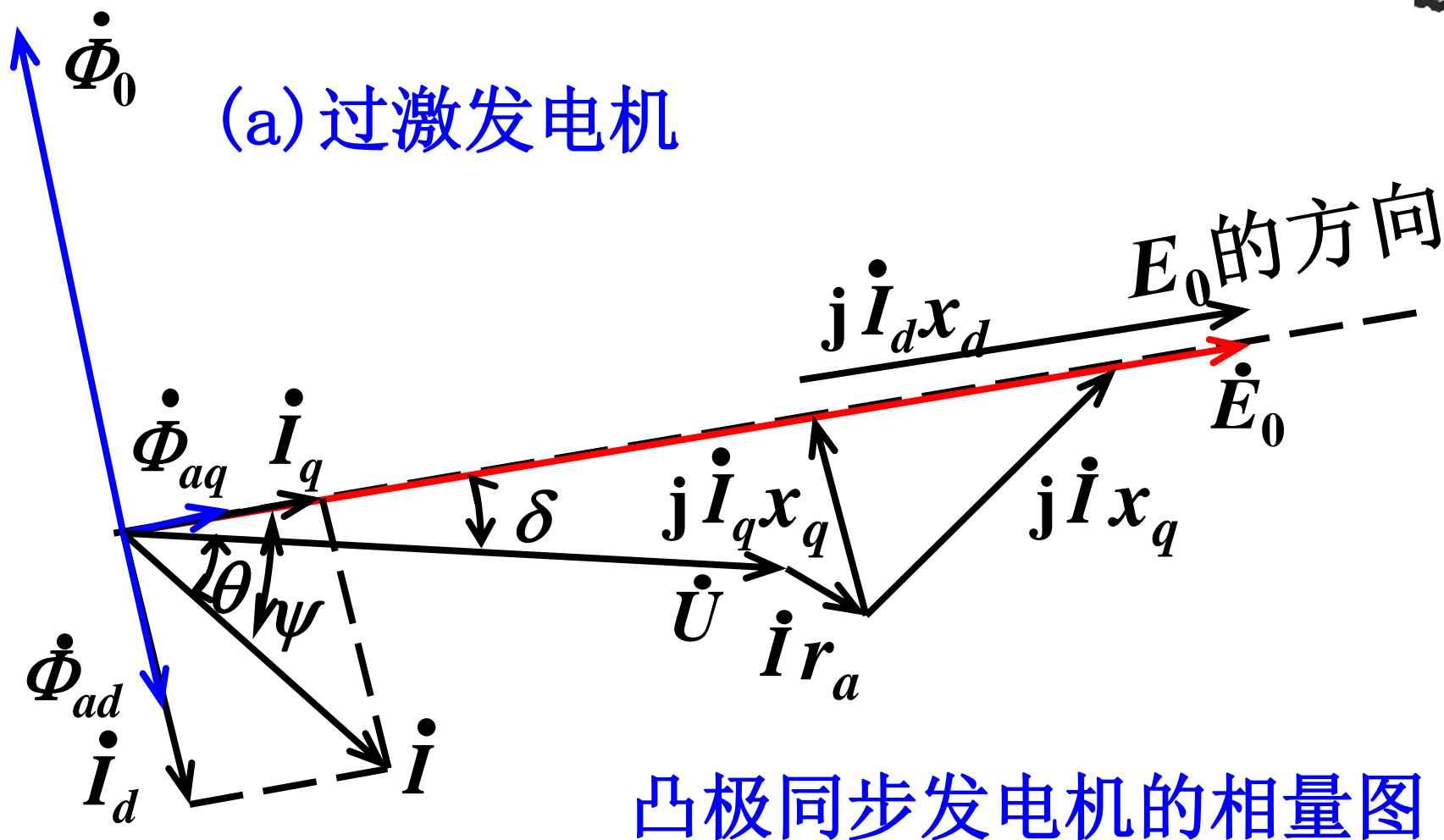
- 作凸极同步发电机的相量图

– 方程两边各加  $\mathbf{jI_d X_q}$

$$\dot{E}_0 - \underbrace{j \dot{I}_d (x_d - x_q)}_{\text{和 } \dot{E}_0 \text{ 同方向}} = \dot{U} + \dot{I} r_a + j \dot{I} x_q$$

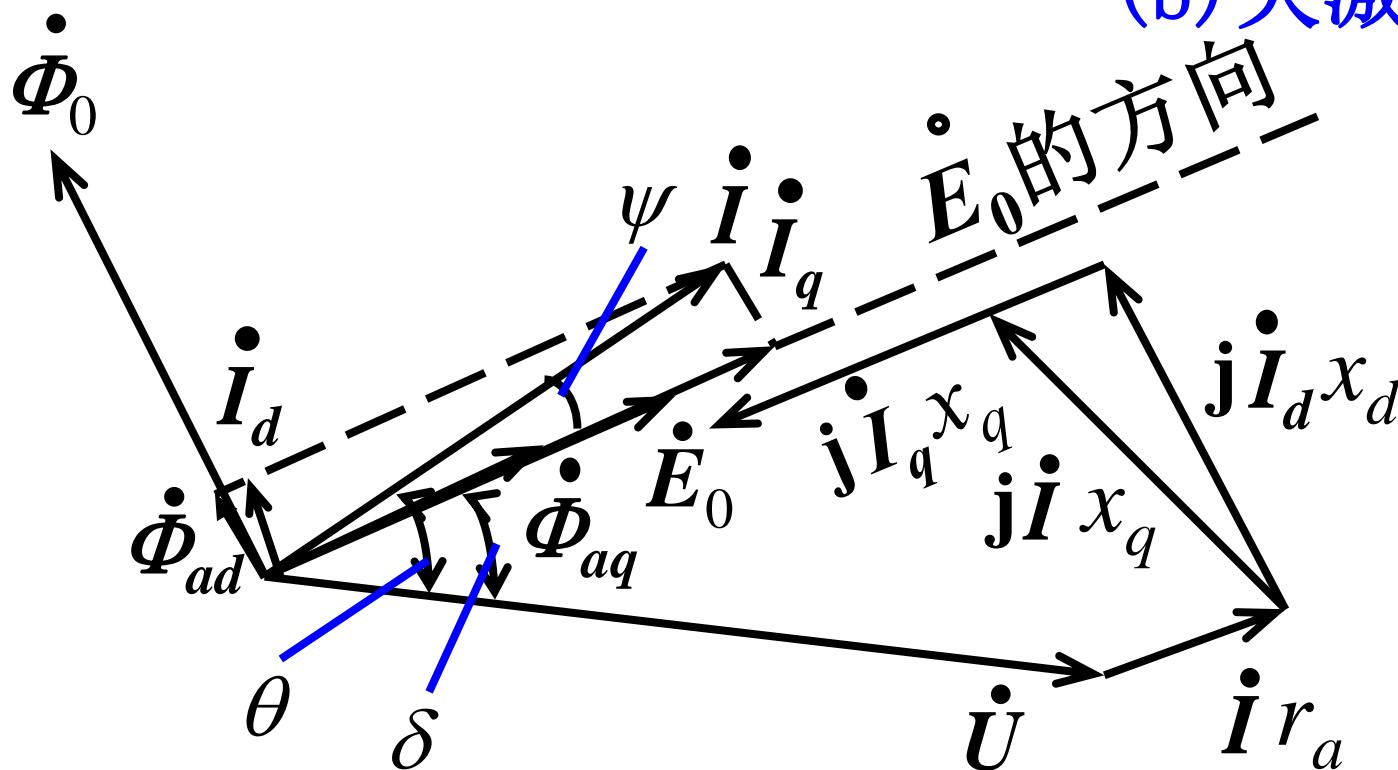
和  $\dot{E}_0$  同方向







(b) 欠激发电机



凸极同步发电机的相量图





- 同步电抗为同步电机的重要参数
  - 常用标么值表示
  - 每相额定电压为电压的基值
  - 每相额定电流为电流的基值
  - 电压与电流基值的比为阻抗的基值
  - 隐极同步发电机的同步电抗标么值在0.9~3.5之间；凸极式同步电机的直轴同步电抗标么值0.6~1.6之间。





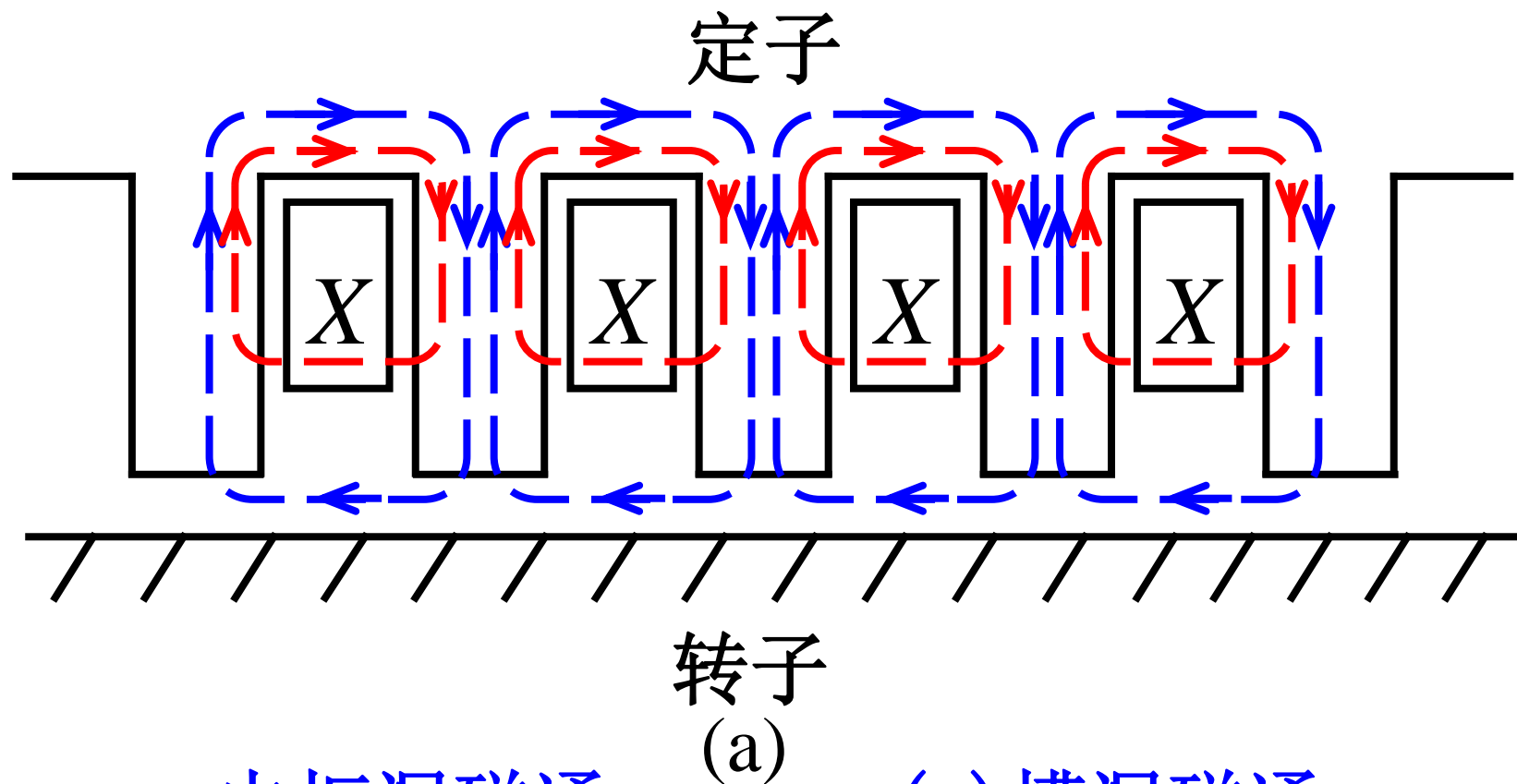
- 互磁通

- 当电枢绕组通过电流时，它所产生的磁通大部分穿过空气隙
- 进入转子磁路并和转子绕组相匝连
- 这部分磁通称为互磁通

- 电枢漏磁通

- 电枢电流产生的磁通中另有一部分只与电枢绕组本身相键链
- 不穿过空气隙
- 这部分磁通称为电枢漏磁通
- 主要包括两个槽漏磁通和端接部分漏磁通

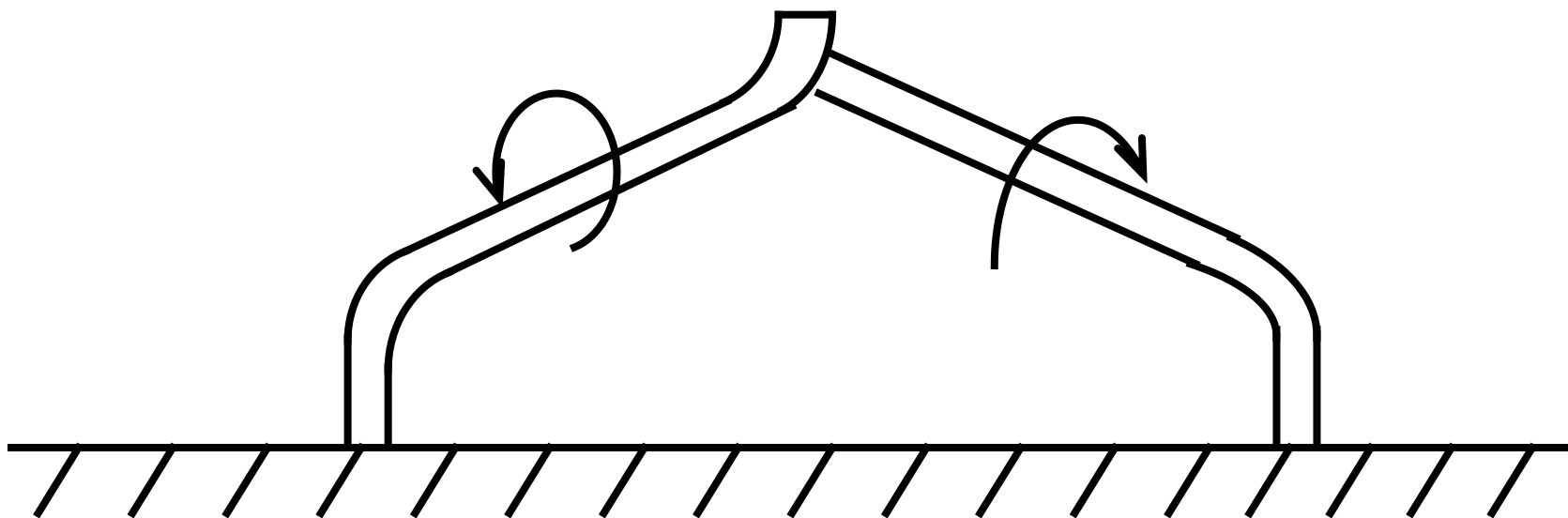
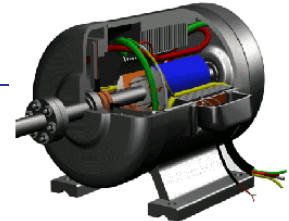




电枢漏磁通

(a) 槽漏磁通





(b)

电枢漏磁通

(b) 端部漏磁通



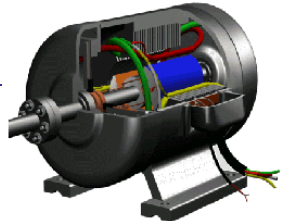


- 漏磁通的特征

- 在电枢绕组中感应电势，这个电势称为漏磁电势，以 $E_{\sigma}$ 表示
- 每相绕组中的漏磁电势和每相电枢电流的比值，即为电枢漏抗 $x_{\sigma}$
- 由于漏磁通的路径主要是非磁性物质，不会饱和，所以 $x_{\sigma}$ 是个常数
- 用标么值表示时 $x_{\sigma}^*$  在0.07~0.45之间







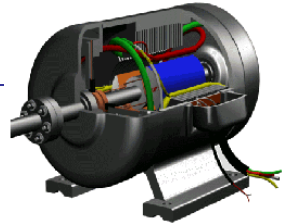
- 谐波漏抗

- 对应于电枢高次空间谐波磁通的电抗，叫做差漏抗或谐波漏抗
- 在电枢绕组中感应电势为基波频率，它与每相电枢电流之比即为差漏抗
- 数值只是电枢漏抗的10%~20%左右
- 实验测得的或计算特性时所用的漏抗，就是电枢漏抗与差漏抗之和。

- 漏抗的量值

- 大型同步发电机中，漏抗的数值远较电枢绕组的电阻为大，容量愈大，二者相差愈大
- 分析同步电机时，尤其对于大型同步发电机，电枢绕组的电阻往往可以忽略不计

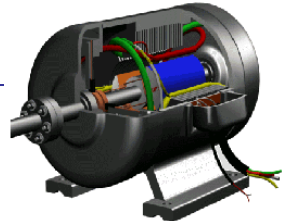




# 同步发电机的基本特性

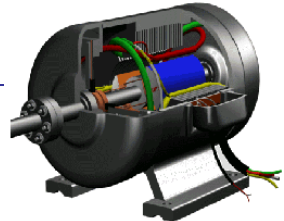
- 同步发电机对称运行
  - 电机转速为额定值且保持恒定
  - 并供给三相对称负载时
- 基本特性
  - $U$   $I$   $I_f$   $\cos \theta$  间的关系曲线





- 空载特性: 当  $I = 0, E_0(U_0) = f(I_f)$
- 短路特性: 当  $U = 0, I_k = f(I_f)$
- 负载特性: 当  $I$  及  $\cos \theta = \text{const}$  时  
 $U = f(I_f)$
- 外特性: 当  $I_f$  及  $\cos \theta = \text{const}$  时  
 $U = f(I)$
- 调整特性: 当  $U$  及  $\cos \theta = \text{const}$  时  
 $I_f = f(I)$





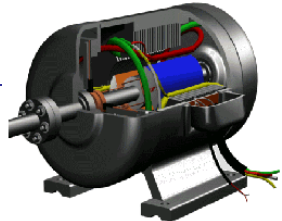
- 主要参数

- 表征同步电机特性的主要参数
- 同步电抗  $x_s$ ,  $x_d$ ,  $x_q$  及漏抗  $x_\sigma$
- 上述变量和参数常用标么值表示。

- 基值的选取

- 电压基值：额定相电压
- 电流基值：额定相电流
- 容量、功率基值：
  - 电压基值乘电流基值
- 阻抗基值：
  - 电压基值除电流基值

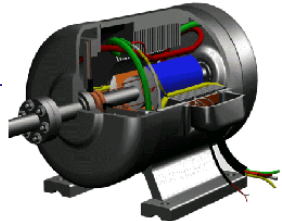




# 同步发电机的空载特性

- 空载运行
  - 转子绕组加上直流激磁
  - 而电枢绕组开路
- 空载特性
  - 转子直流激磁电流 $I_f$ 和空载电势 $E_0$ 的关系
- $E_0 = f(I_f)$ 和 $\phi = f(F_f)$ 相似
  - 空载电势和转子磁场的每极磁通 $\Phi$ 成正比
  - 转子激磁电流和激磁磁势成正比
  - 选用不同的比例尺,  $E_0 = f(I_f)$ 和同步电机的磁化曲线是相同的
- 空载特性可通过磁路计算或实验测得

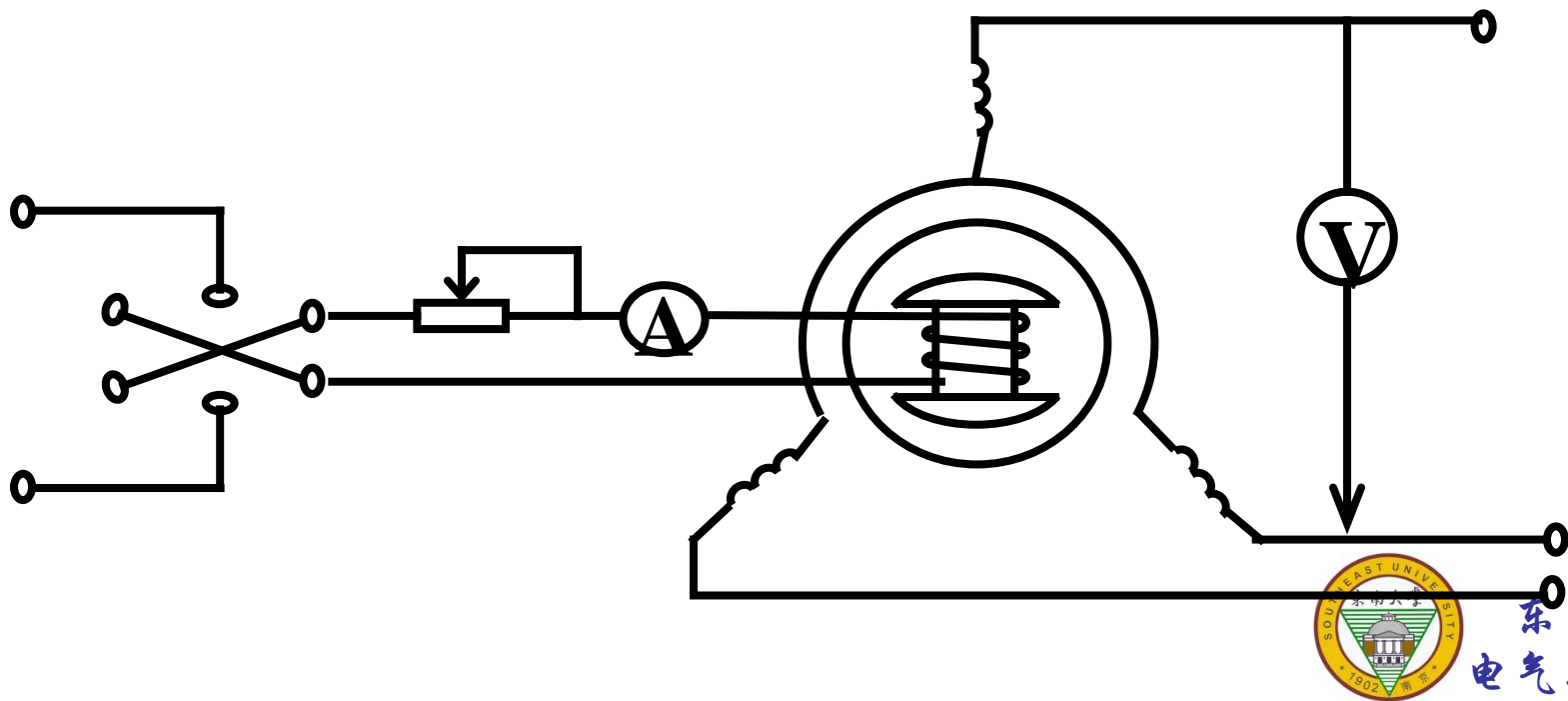


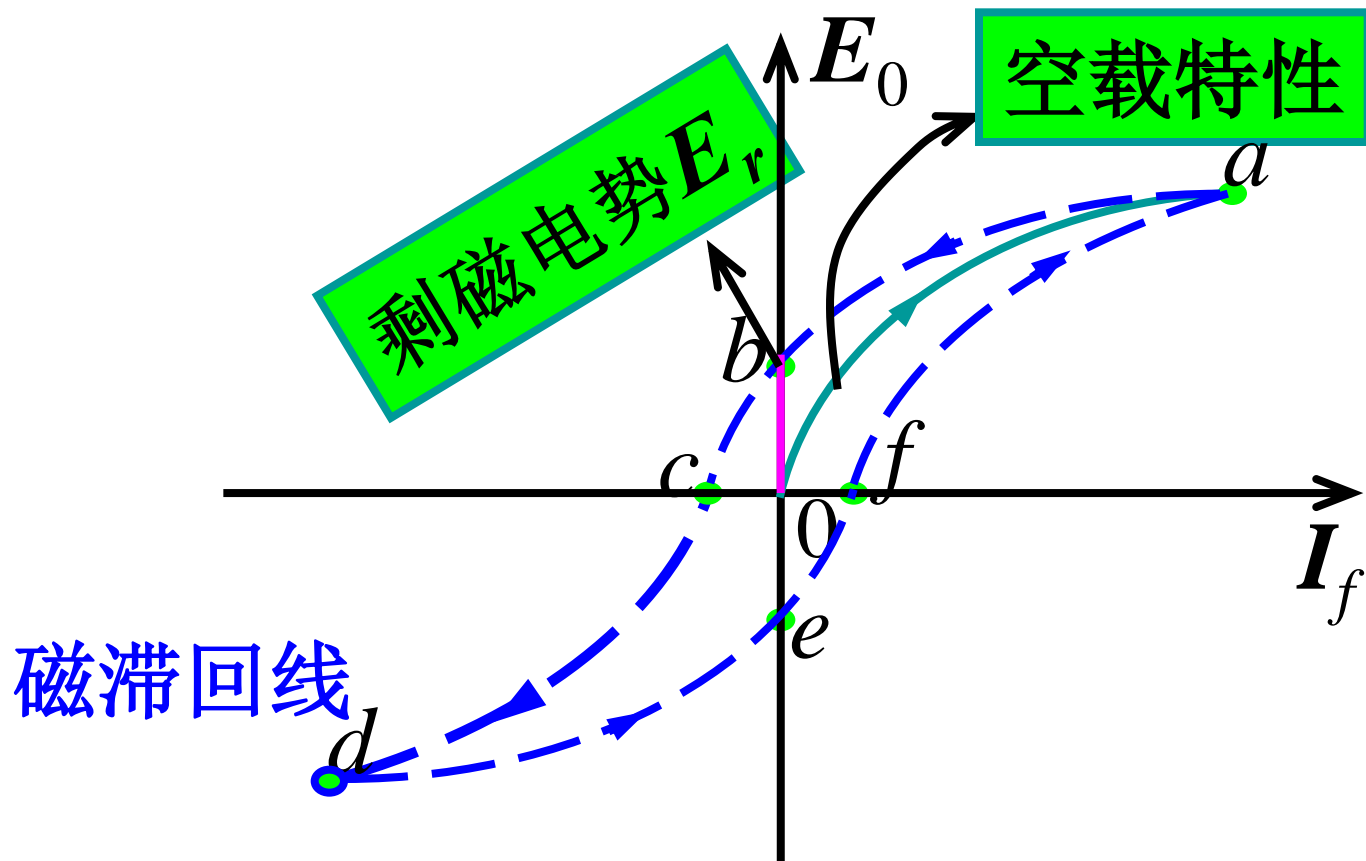
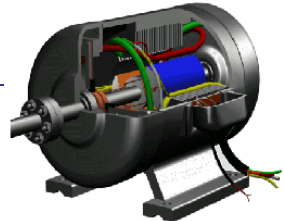


- 空载特性的实验测定

- 同步电机用原动机拖动，且保持额定转速不变
- 调节可变电阻，多次测激磁电流 $I_f$ 和定子绕组的电势 $E_0$ 的值。

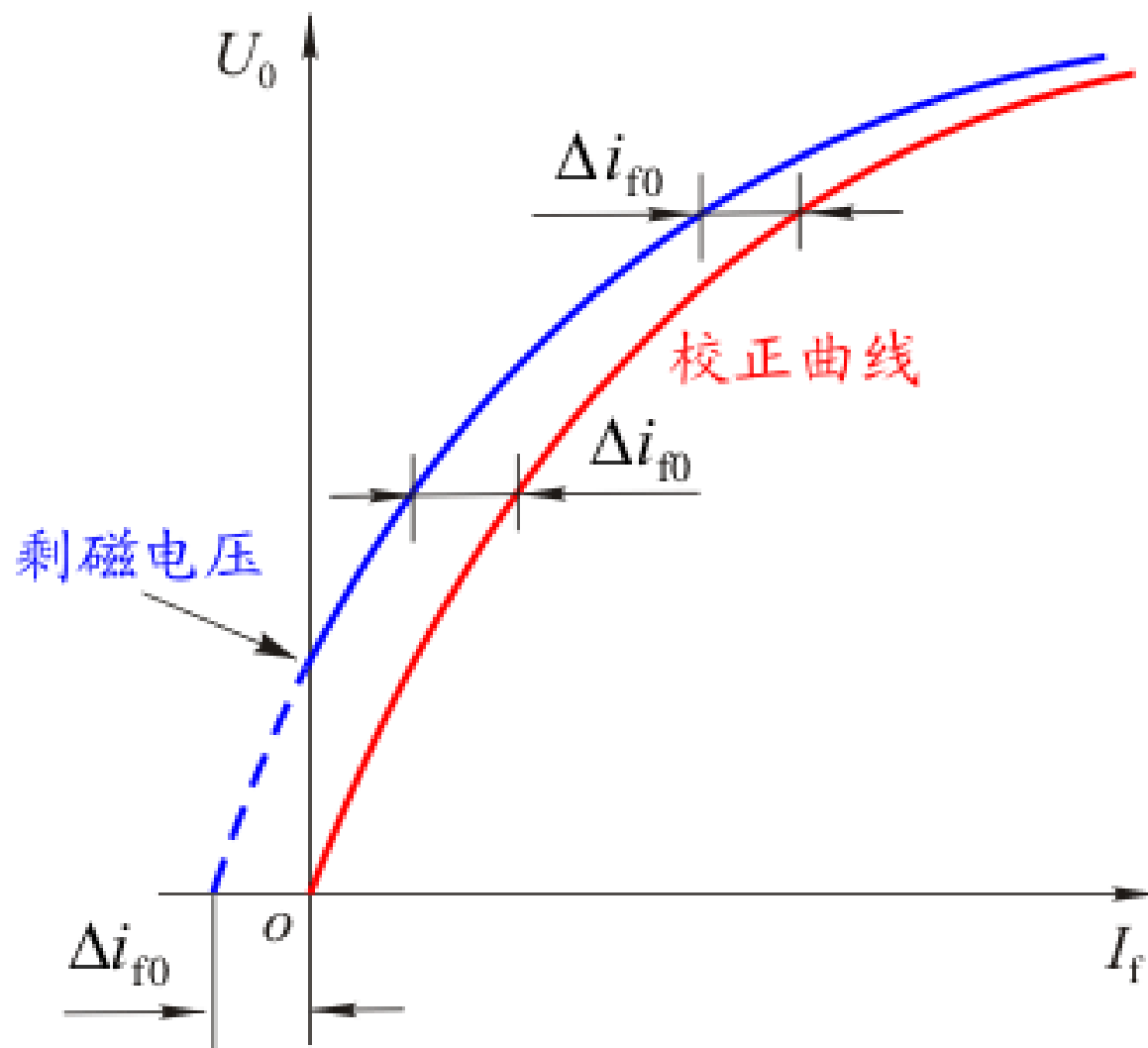
- 在测量空载特性时，应使激磁电流顺着同一个方向改变，不能忽增忽减





- 对于已经激磁过的电机
  - 由于存在剩磁，上述试验不能测得过原点的空载特性曲线0a
  - 为此，规定用下降曲线来表示空载特性

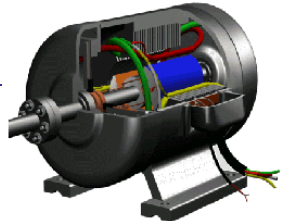




空载特性的实验测定及校正

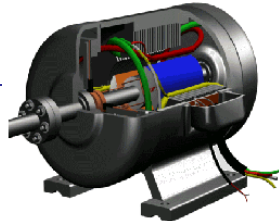






- 典型的空载特性
  - 用标么值表示
  - 空载特性彼此是非常相近的
    - 不论电机容量的大小、电压的高低
  - 与典型的空载特性相比较
    - 判断该电机的磁路过于饱和或材料没有充分利用

$I_f^*$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$E_{0*}$	0.58	1.0	1.21	1.33	1.40	1.46	1.51

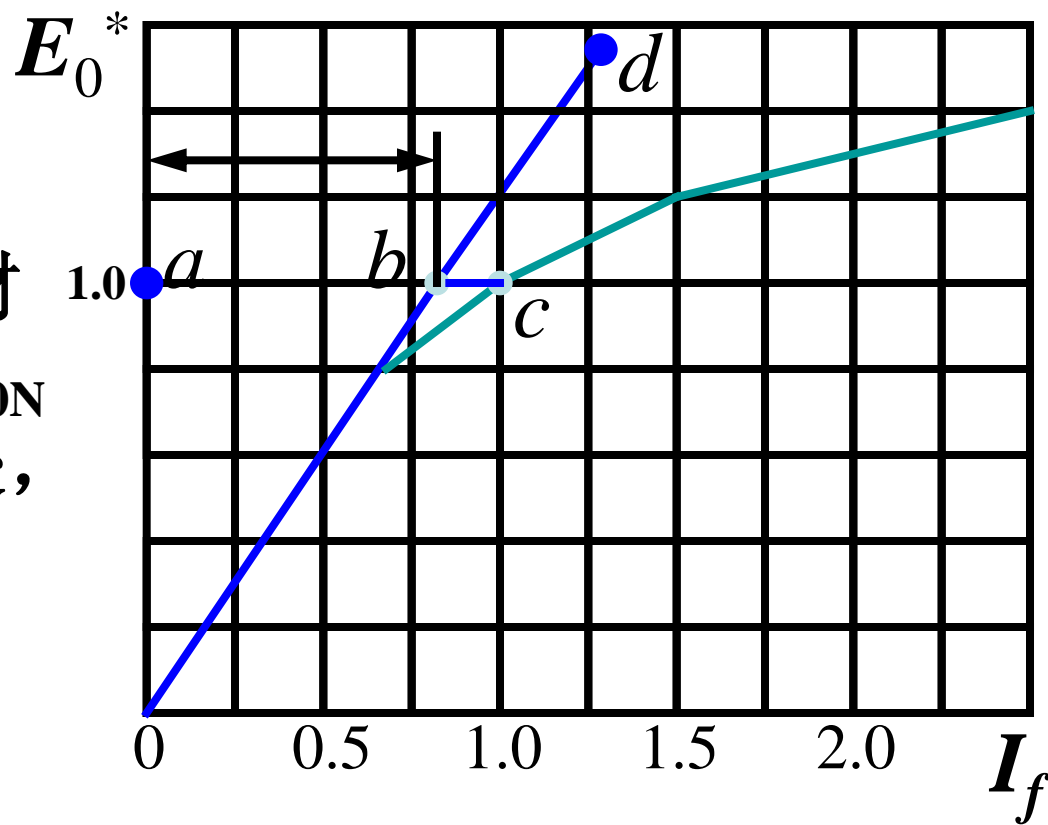


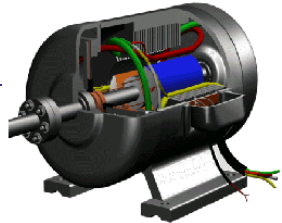
## 电机的饱和系数

- $E_0^*$  为1时的总磁势和气隙磁势之比为，用  $K_u$  表示，

$$k_\mu = ac / ab$$

- 为了合理利用有效材料，空载额定电势  $E_{0N}$  通常设计在的弯曲处， $K_u$  约为1.2左右



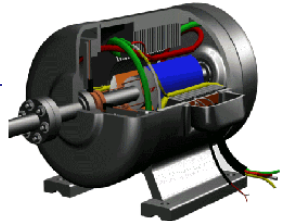


# 同步发电机的短路特性

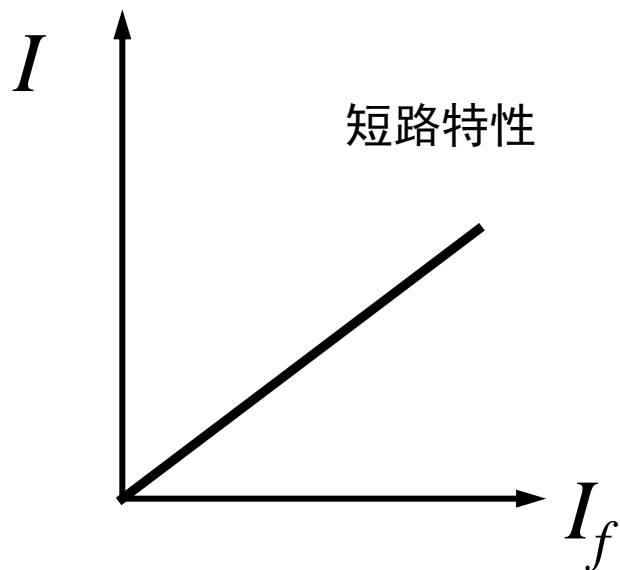
- 短路特性
  - 发电机三相稳态短路试验时，电枢短路电流  $I_k$  与激磁电流  $I_f$  间的关系
  - 发电机短路后，端电压为0，电枢短路电流

$$\dot{I}_k = \dot{E}_0 / Z_s \approx \dot{E}_0 / jx_s$$





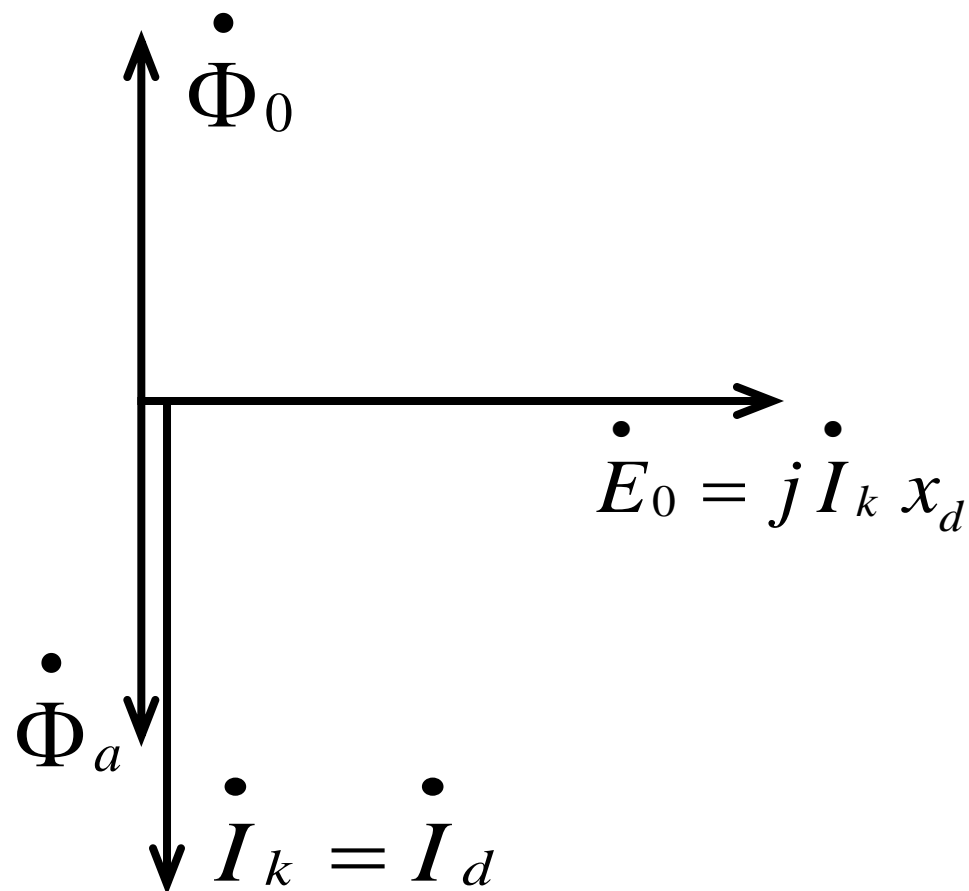
- 短路电流为纯感性电流
  - 电阻远小于同步电抗
  - 内功率因数角接近 $90^\circ$  滞后
  - 电枢电流只有直轴分量，它所产生的电枢反应为纯粹的去磁作用
- 短路特性为一条直线





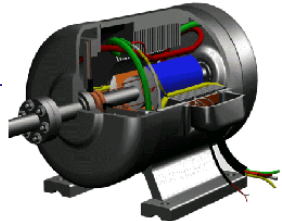
– 同步发电机短路时的电压方程式

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{E} = \dot{I}(r_a + jx_\sigma)$$



同步发电机在短路时的相量图

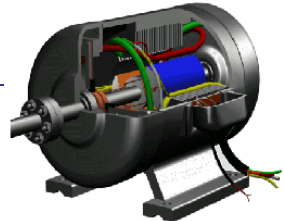




- 短路特性的测定

- 应先将三相电枢绕组在出线端处短接
- 再起动原动机将发电机带到同步转速
- 通入不同数值的激磁电流 $I_f$ ，读取每次相应的短路电流 $I_k$
- 由于磁势很小，磁路处于不饱和状态，短路特性是一条过原点的直线

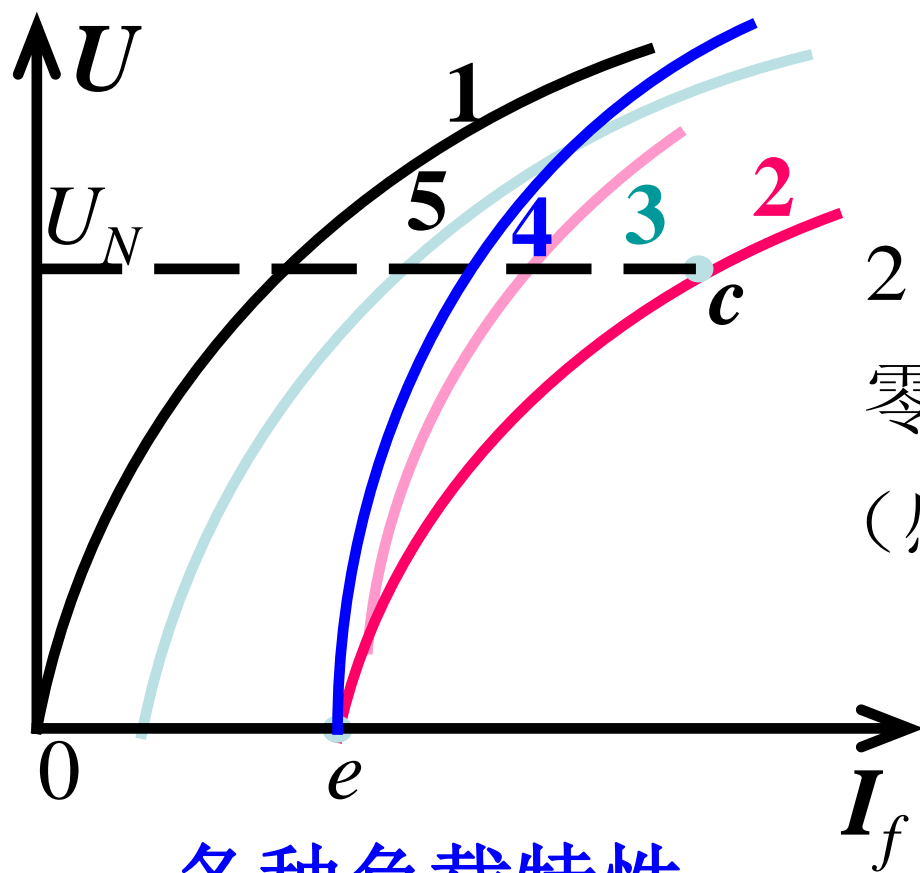




# 同步发电机的负载特性

- 负载特性
  - 当电枢电流  $I$  及功率因数  $\cos \theta$  均为常数时，端电压与励磁电流间的关系
  - $U = f(I_f)$
  - $I = 0$  时空载特性
  - 具有实用意义的
    - 零功率因数曲线
  - 或称感应性负载特性曲线





各种负载特性

1: 空载特性,  $I = 0$ ;

2:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\cos \theta = 0$ ,  $I = I_N$ ,  
零功率因数曲线

(感性负载特性曲线);

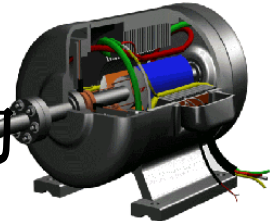
3:  $\theta > 0$ ,  $0 < \cos \theta < 1$ ,  $I = I_N$

4:  $\theta = 0$ ,  $\cos \theta = 1$ ,  $I = I_N$ ;

5:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\cos \theta = 0$ ,  $I < I_N$

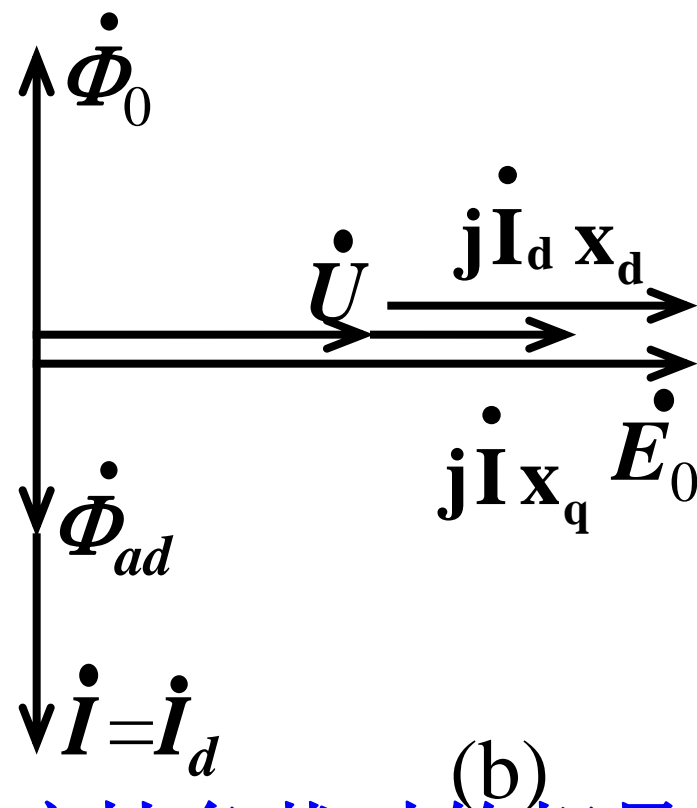
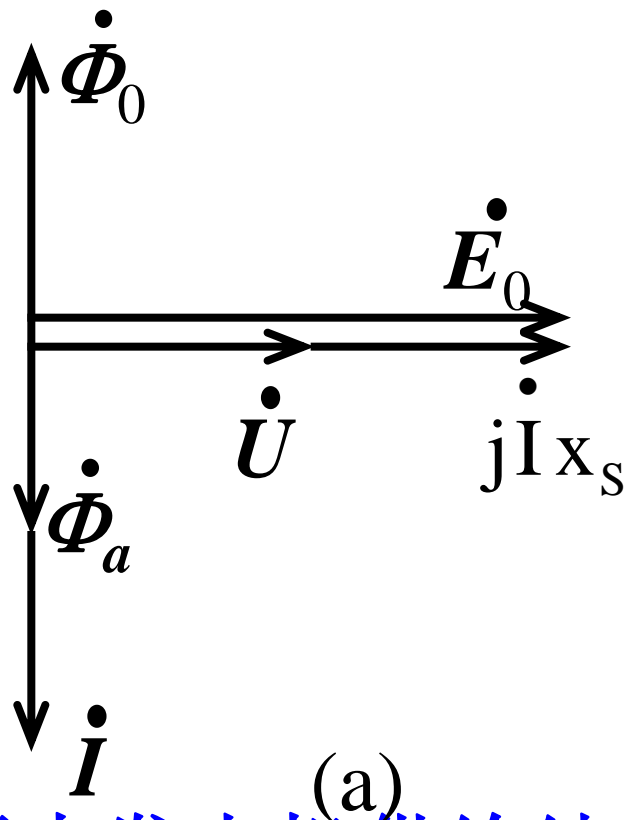






- 当同步发电机带纯感性负载时，发电机的端电压为

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j \dot{I} x_s = \dot{E} - j \dot{I} x_\sigma$$



当同步发电机供给纯感性负载时的相量图

(a) 隐极式 (b) 凸极式



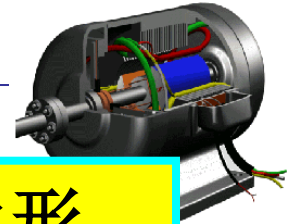


- 由图可见，此时  $\dot{E}_0$  和  $\dot{U}$  同相，即有  $\theta = \Psi = 90^\circ$ ，磁势间的关系以及电势间的关系都是代数关系，即

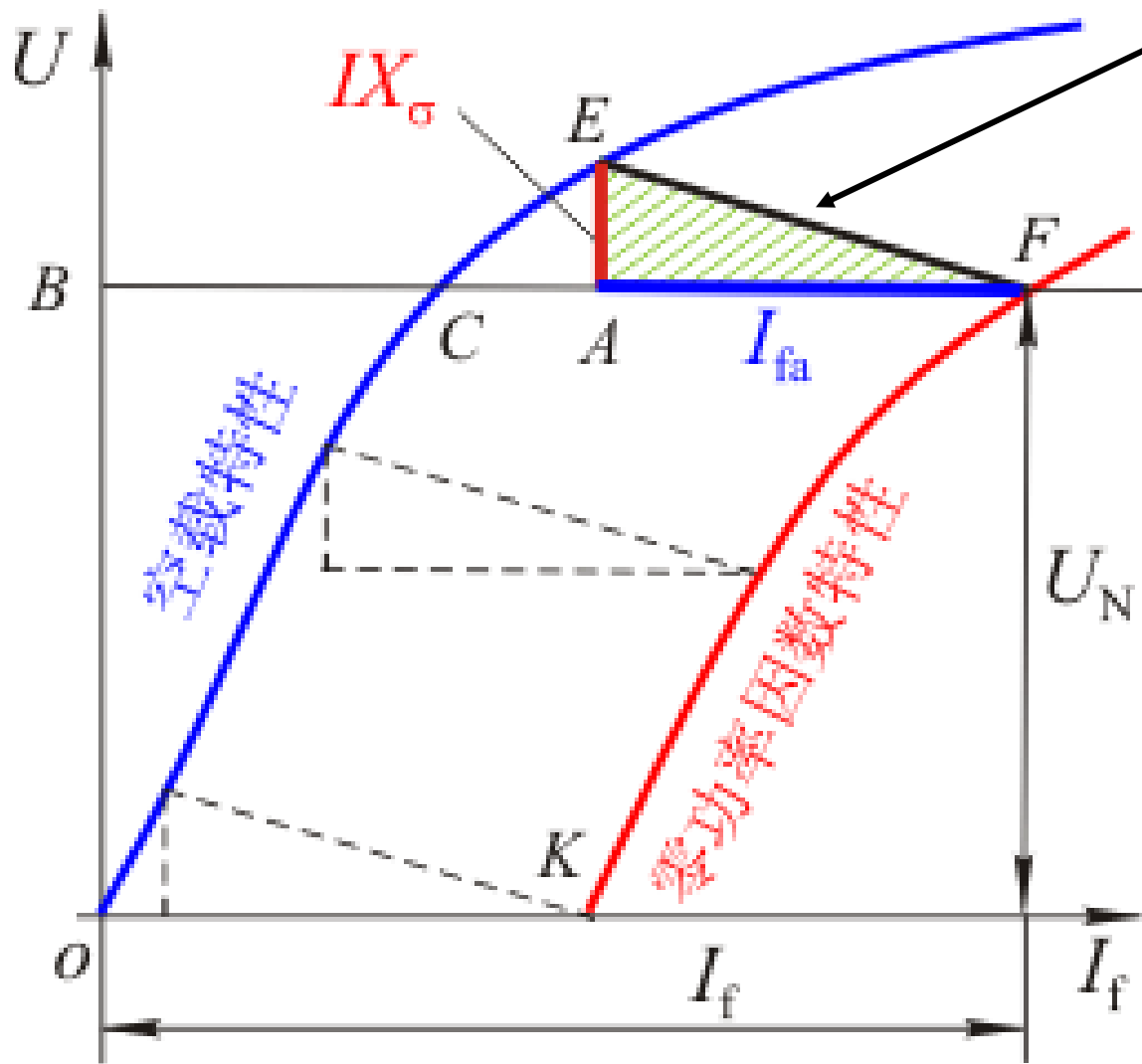
$$\left. \begin{aligned} F_\delta &= F_f - k_{ad} F_{ad} \\ U &= E_0 - Ix_s = E - Ix_\sigma \end{aligned} \right\}$$

- 若已知电枢漏抗  $x_\sigma$  以及相当于电枢反应去磁作用的激磁电流，就可直接由空载特性推导出零功率因数曲线



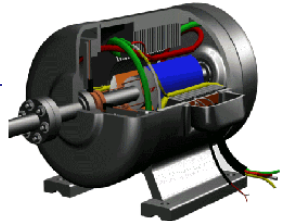


电抗三角形



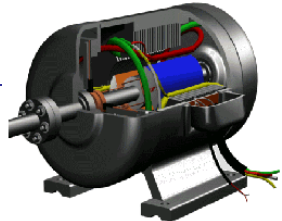
特性三角形





- 零功率因数曲线的实验测量
  - 电枢接到可变的三相纯电感负载
  - 同时调节发电机的激磁电流和负载，使电枢电流保持为额定值
  - 记录不同激磁下的发电机端电压，即得零功率因数曲线。
- 对于大容量的同步发电机
  - 很难得到容量相当的纯电感负载，所以不能用上述方法来求取整条零功率因数曲线
  - 用简单的方法求得零功率因数曲线上两个关键的坐标点，即曲线上的 $K$ 点和 $F$ 点





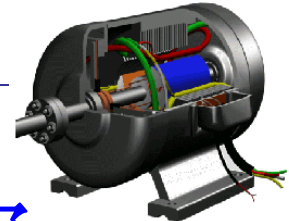
- $K$ 点

$U=0, I=I_N$ 显然为一短路点，可由短路试验求得。

- $F$ 点

- 发电机接额定电压的电网，同时调节原动机及励磁电流，使发电机处于过激状态，电枢电流为额定值，而输出的有功功率为零。此刻的励磁电流 $I_f$ 及额定电压 $U_N$ 就决定了 $F$ 点
- 实际上要使  $\cos \theta = 0$  是有困难的，但只要保持  $\cos \theta < 0.2$ ，已能获得足够准确的结果





## 第九节 同步发电机的参数及测定

### 一、同步电抗的实验测定

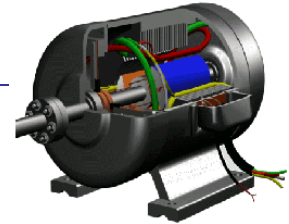
- 不饱和同步电抗的测定

- 利用空载特性和短路特性来确定同步电抗

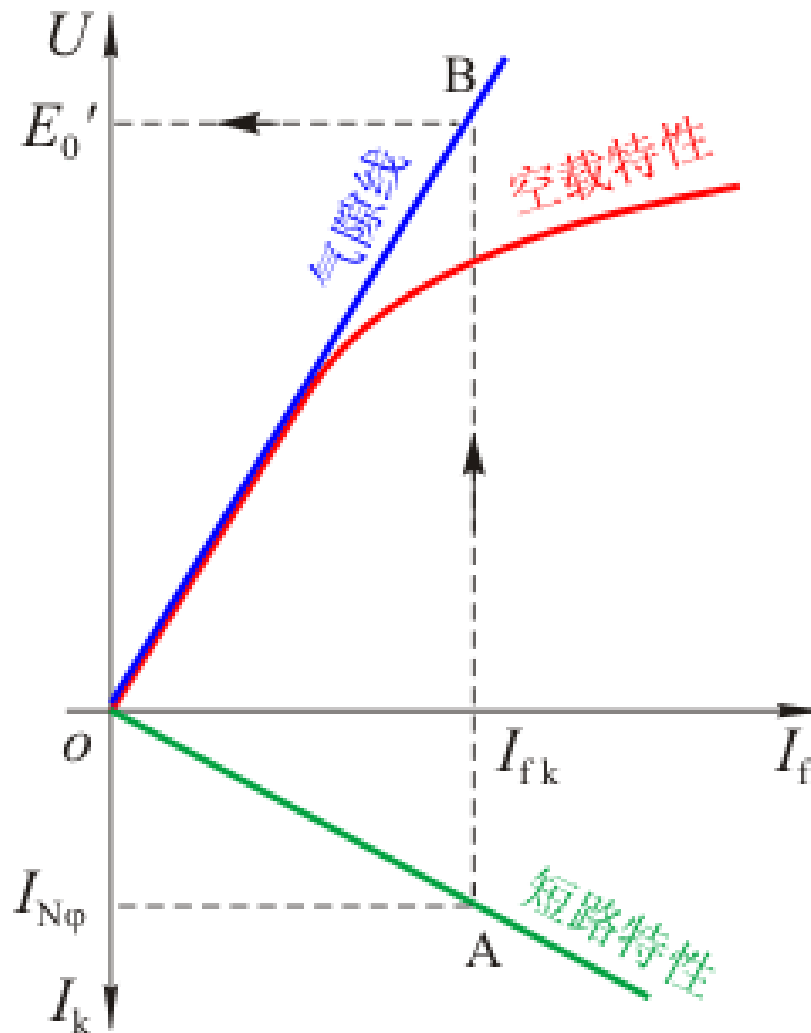
- $x_s$  或直轴同步电抗  $x_d$

- 在某一固定的激磁电流时，每相空载电势与每相短路电流之比，便为每相同步电抗





$$x_d = x_s = \frac{E_0'}{I_k}$$



确定 $X_d$ 的不饱和值

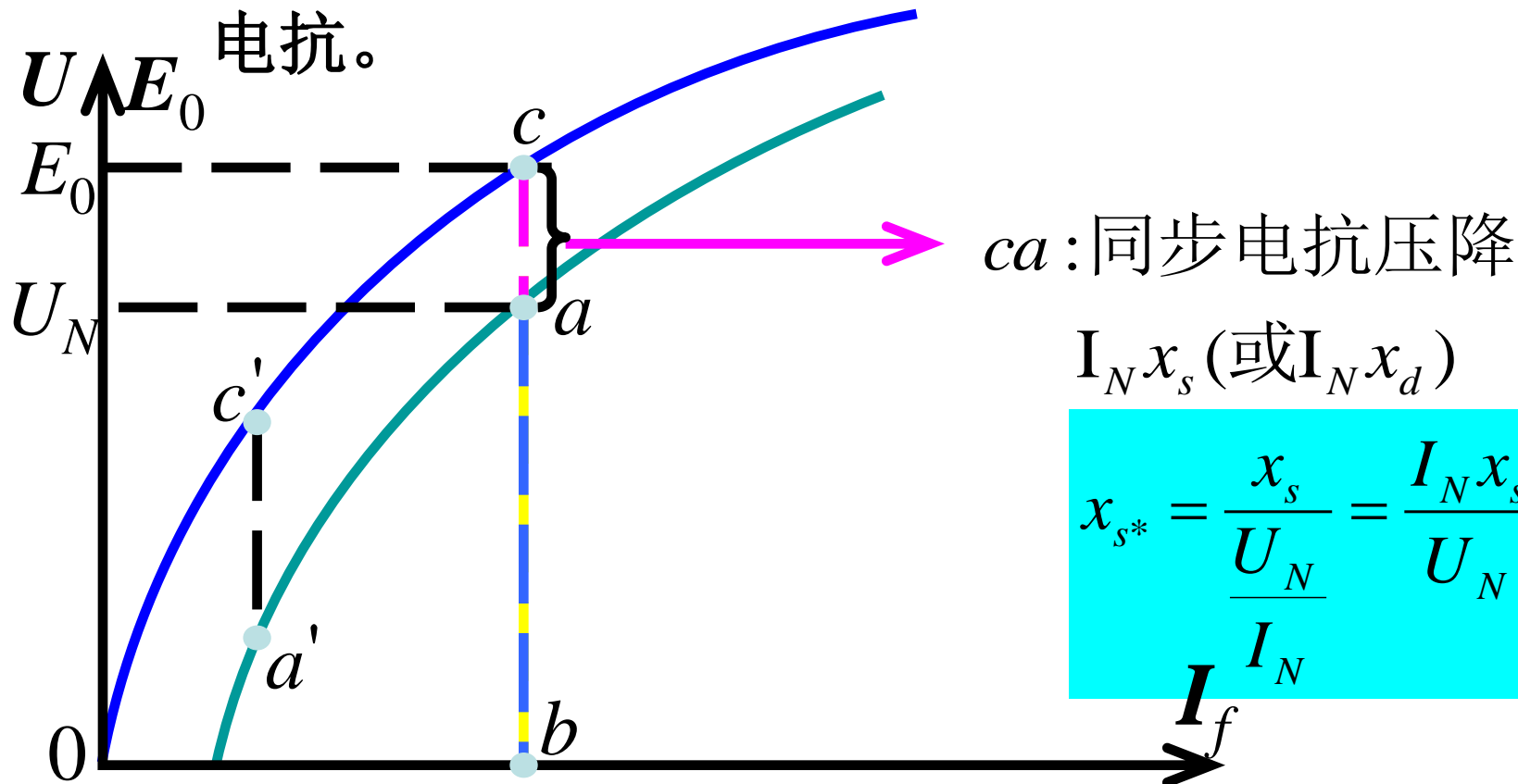
- 对隐极机而言
  - 所测得的同步电抗即  $x_s$
- 对凸极机而言
  - 短路电流为直流电流，所得系直轴同步电抗  $x_d$
- 而凸极机的交轴同步电抗需要用其它的方法测定  $x_q$





## • 饱和同步电抗

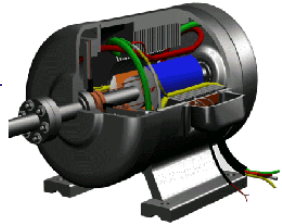
- 可以从空载特性和零功率因数曲线求取饱和同步电抗。



求饱和同步电抗的图解法



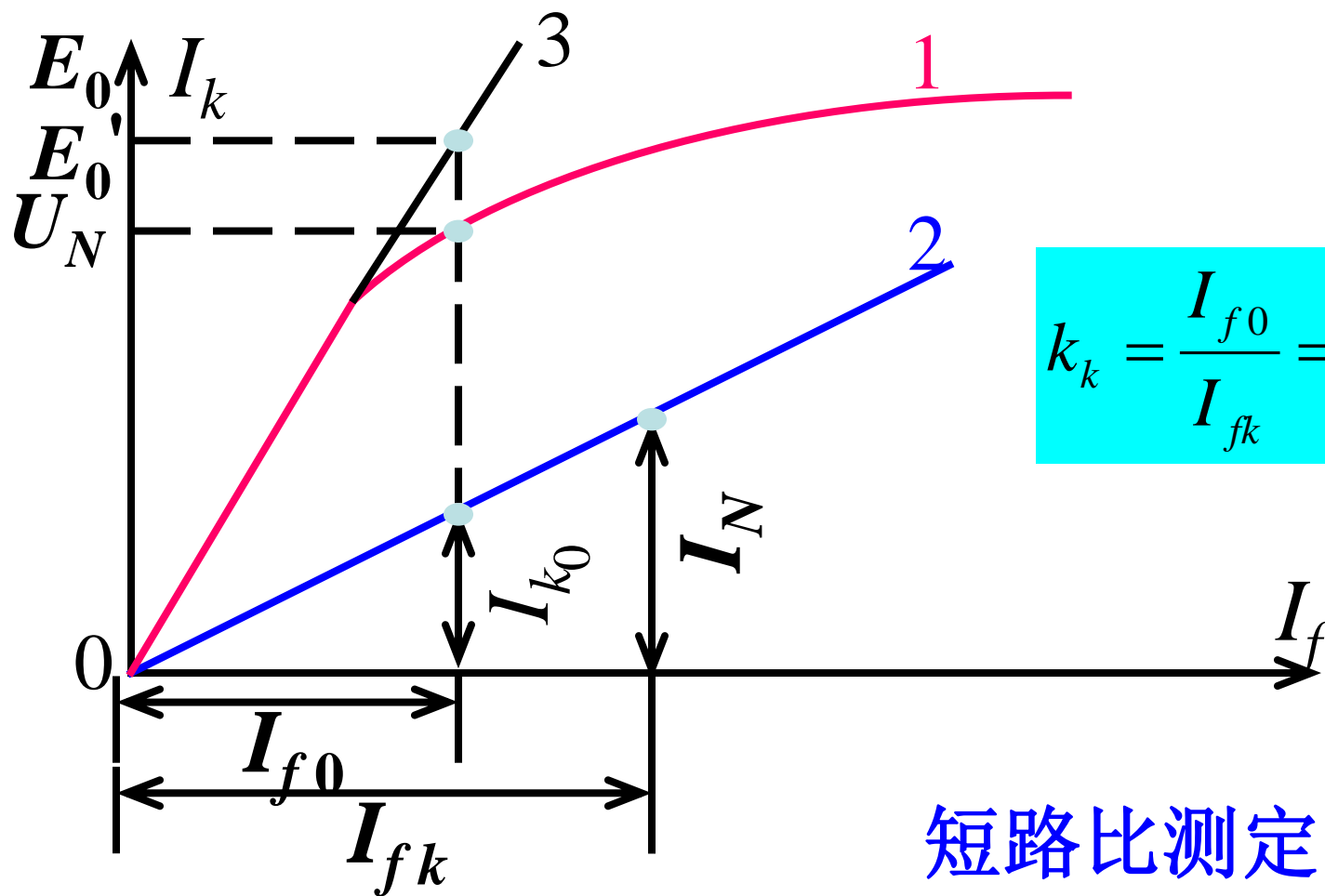




- 短路比

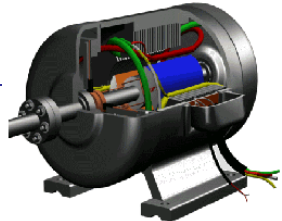
- 在空载时使空载电势有额定值时的励磁电流与在短路时使短路电流有额定值时的励磁电流之比称为**短路比**
- 用 $k_k$  代表





短路比测定





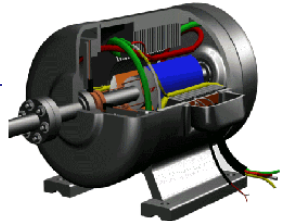
- 短路比与同步电抗

- 设  $x_d$  为不饱和同步电抗，则

$$\mathbf{x}_{d*} = \frac{\mathbf{E}_0'}{\mathbf{I}_{k0}} \times \frac{\mathbf{I}_N}{\mathbf{U}_N} = \mathbf{C}_0 \frac{\mathbf{I}_N}{\mathbf{I}_{k0}} = \mathbf{C}_0 \frac{1}{\mathbf{k}_k}$$

- 由于电机磁路的饱和，  $\mathbf{C}_0 > 1$
  - 短路比要比不饱和同步电抗标么值的倒数略大





## • 短路比的选择

- 短路比较大，发电机的过载能力强，负载引起的端电压的变化则较小。这将增大电机的气隙，导致电机尺寸的增大以及转子激磁绕组的安匝增加
- 短路比较小时，发电机的短路电流较小，但它的稳定性较差。
- 我国制造的
  - 汽轮发电机的短路比一般在 $0.5 \sim 0.7$ 之间
  - 水轮机因转子散热条件较好，及水电站的输电距离较长，稳定性问题比较突出，故取得稍高，一般在 $1.0 \sim 1.4$ 之间。

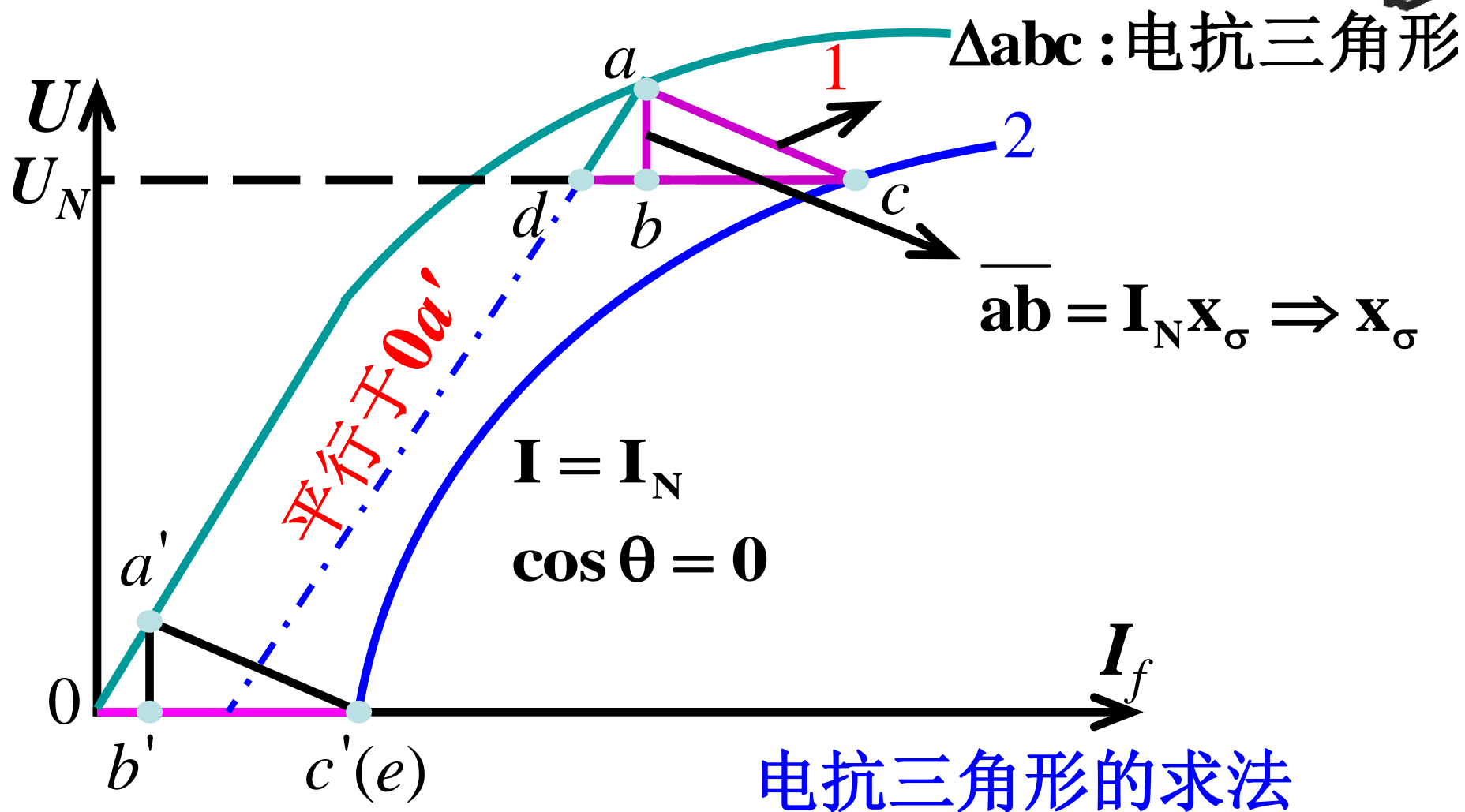
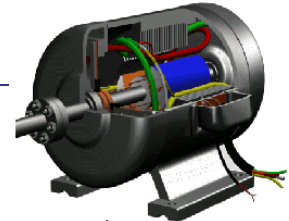


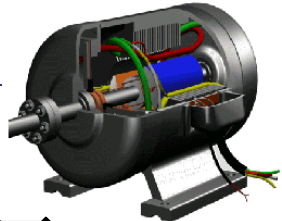


## 漏抗的测定和保梯电抗

- 漏抗的测定
  - 由空载特性和零功率因数曲线确定漏抗 $x_\sigma$
  - 为了求漏抗 $x_\sigma$ 并不需要作出整条零功率因数曲线，只要找到曲线上的两个特定点 $e$ 和 $c$
  - 利用电抗三角形确定 $x_\sigma$







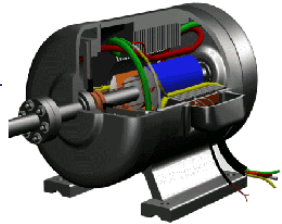
- 抽出转子法

- 抽出转子，在定子绕组上外施对称三相电压，其频率应为额定值
- 使流入定子绕组中的电流有额定值
- 电枢电阻可以略去不计
- 每相外施电压与额定电流之比便为所求的漏抗

- 应用抽出转子法测得的漏抗要比实际的漏抗略大

- 因为在把转子取出后，定子绕组所产生的漏磁通，除了应计入实际漏抗中的各种漏磁通外，还存在一小部分位于转子所占有的空间中磁通

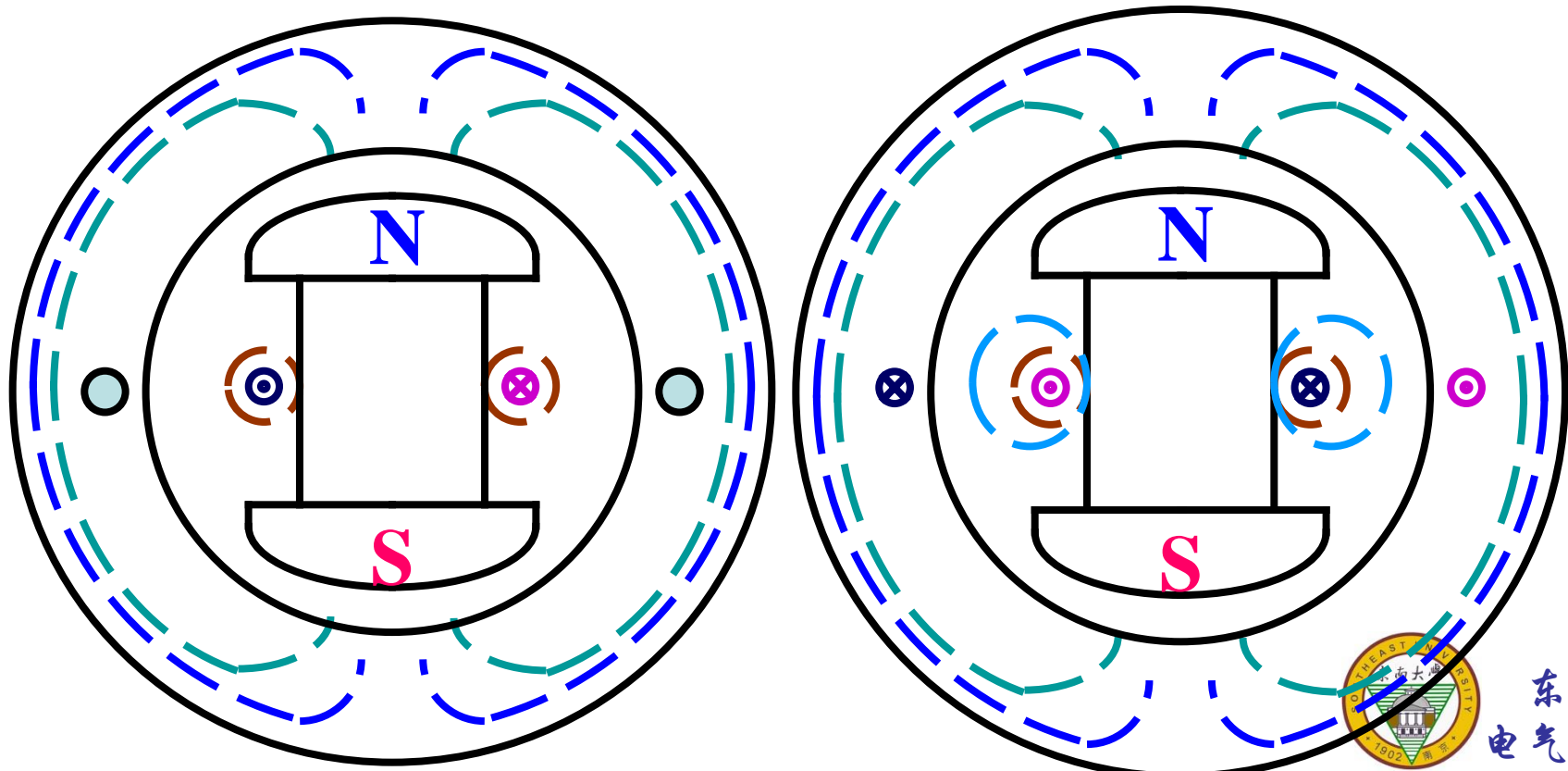




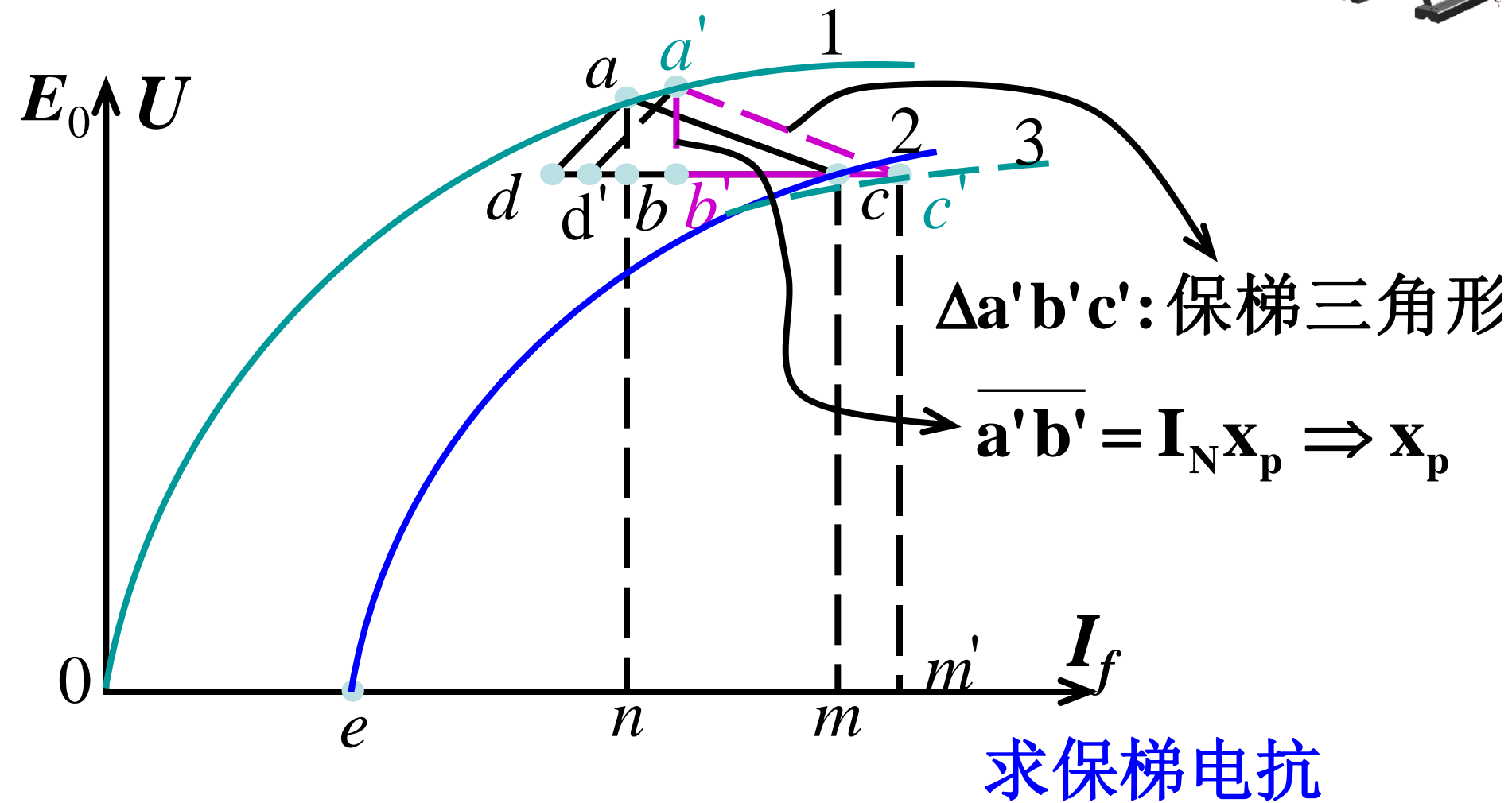
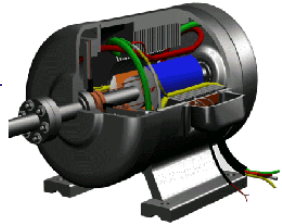
- 保梯电抗

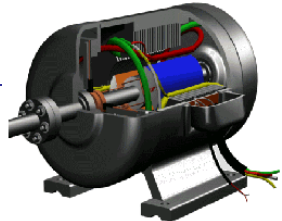
- 实验测得的零功率曲线与理论零功率因数曲线略有差别

- $c$ 、 $a$ 两点的气隙合成磁势和气隙磁通密度相同，但 $c$ 点的激磁磁势大于 $a$ 点的激磁磁势







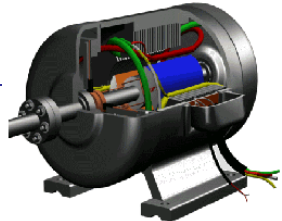


- 对应实测的零功率因数曲线求得的电抗
  - 为保梯电抗  $x_p$
  - $x_p$  略大于  $x_\sigma$
  - 电抗三角形  $a'b'c'$ ，称为保梯三角形
- 对于隐极同步机，因极间漏磁通较小，故  $x_p \approx x_\sigma$ ；对于凸轮机，则

$$x_p = (1.1 \sim 1.3)x_\sigma$$

- 在计算同步发电机的电压变化率和额定激磁电流时，磁路情况更接近于零功率负载试验，因此应用  $x_\sigma$  代替实际漏抗  $x_p$ ，会获得更准确的结果

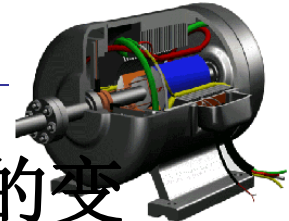




## • 转差率试验

- 转差率试验可以同时求出同步电机的 $X_d$ 和 $X_q$
- 把被试同步电机的转子激磁绕组开路，不加激磁，转子由原动机带动，使它的转速接近于同步转速，约有1% ~2%的转差
- 定子上，外施对称低电压，且使其相序能保证电枢旋转磁场的转向与转子的转向一致
- 此时，定子旋转磁场以转差率速度掠过转子。当定子磁场轴线与转子直轴重合时，电抗达最高值，电枢电流便有最小值。当磁场与转子的交轴重合时，电抗达最低值，则电枢电流便有最大值

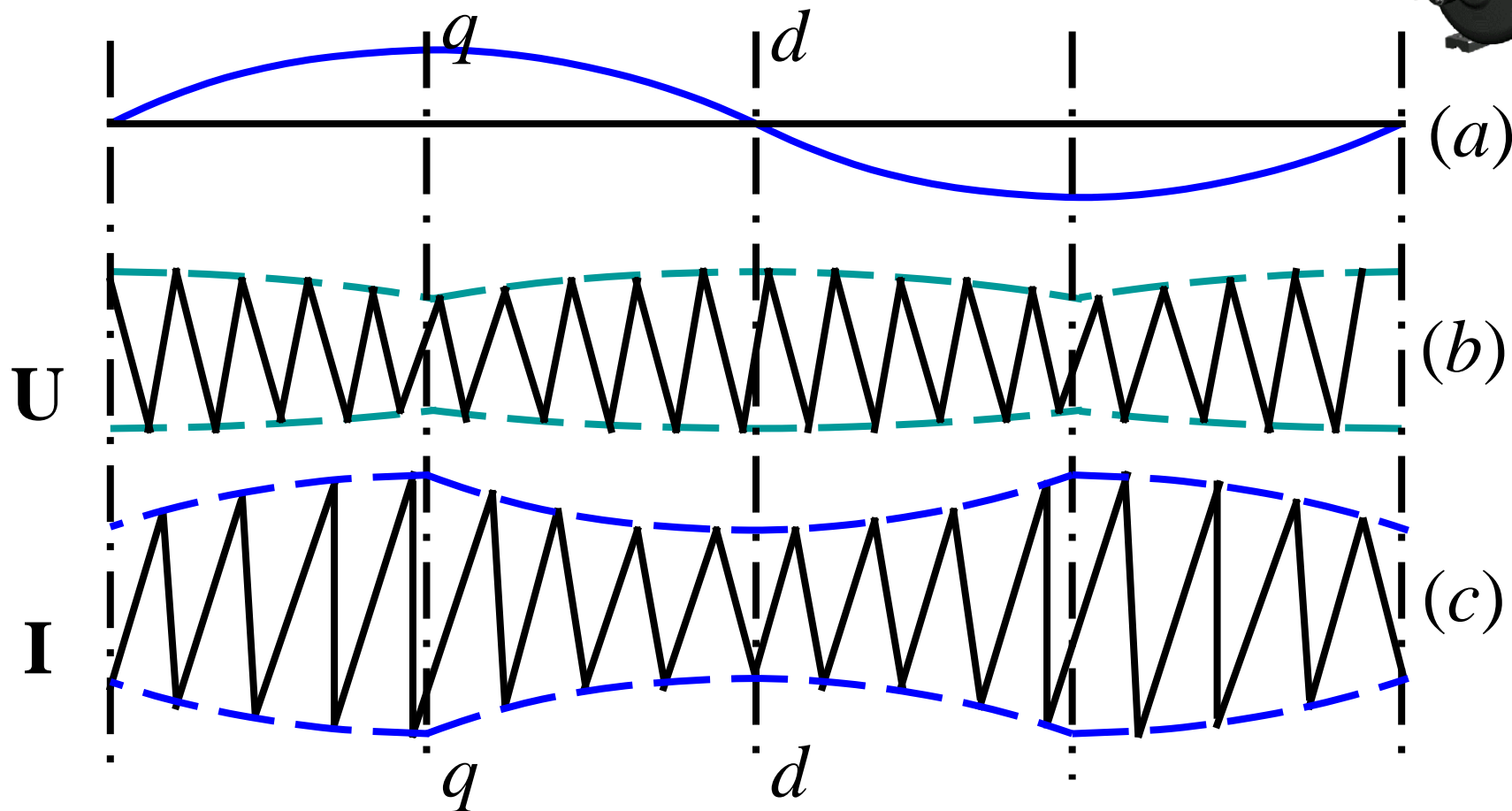
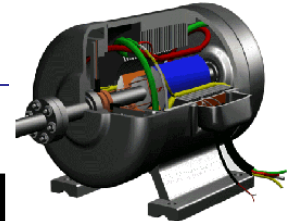




- 由于线路中电压降的影响，随着电枢电流的变化，定子绕组上测得的电压也有相应的变动
- 由于转差率很低，电流表和电压表的指针来得及跟着摆动，故可以直接读出最大电流  $I_{\max}$ 、最小电流  $I_{\min}$  和最大端电压  $U_{\max}$ 、最小端电压  $U_{\min}$
- 设量得的电流和电压都为每相值，则得每相的同步电抗  $X_d$  和  $X_q$  分别为

$$\left. \begin{aligned} x_d &= \frac{U_{\max}}{I_{\min}} \\ x_q &= \frac{U_{\min}}{I_{\max}} \end{aligned} \right\}$$





转差率试验时用示波器摄取的波形图





## 第十节 同步发电机的稳态运行特性

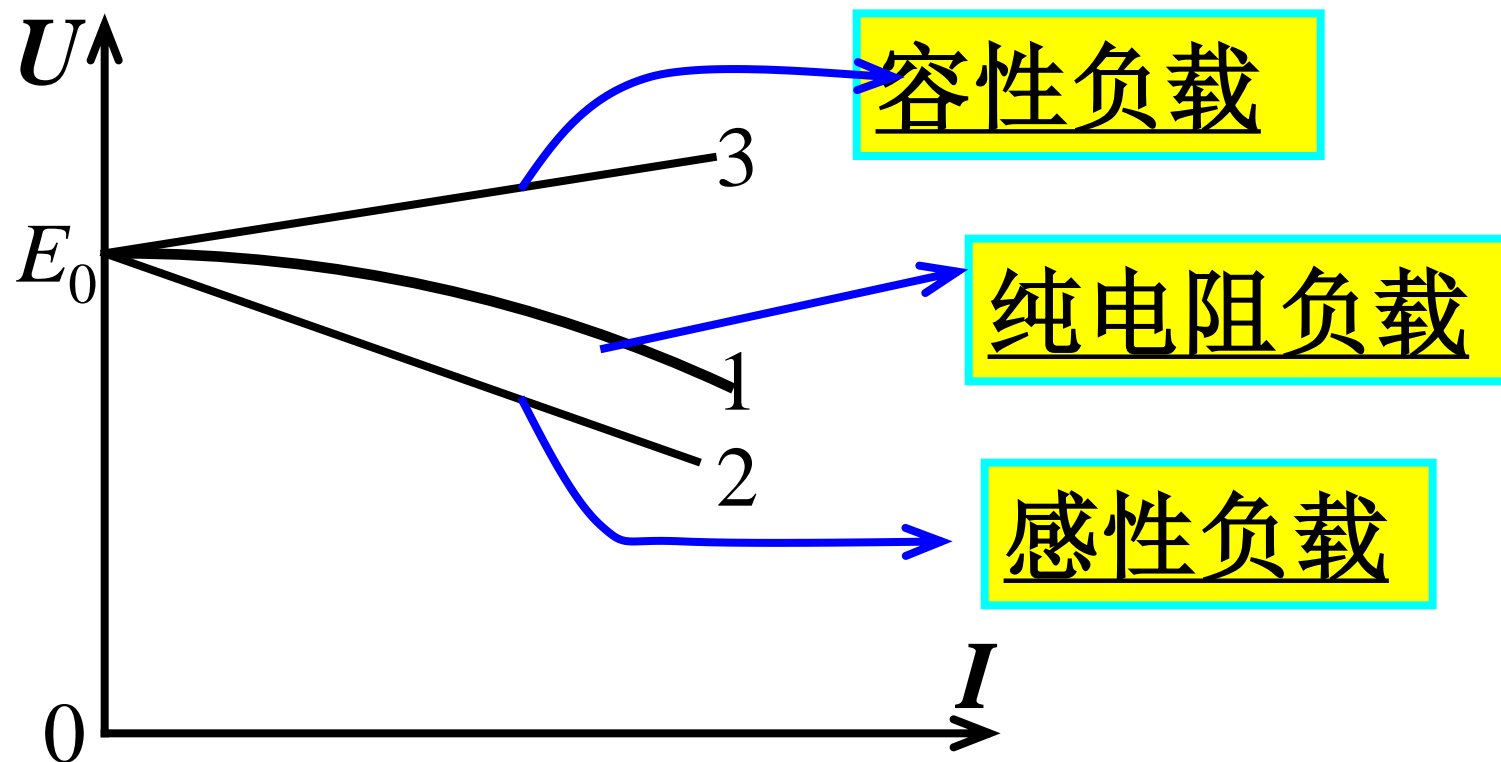
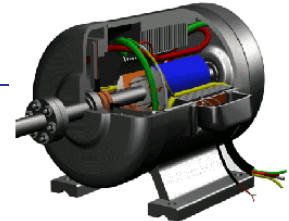
- 外特性

- 同步发电机正常运行情况下

- $I_f = \text{const}, \cos \theta = \text{const}$ 时

- $U = f(I)$  为外特性





外特性  $U = f(I)$





## — 纯电阻负载

- 由于定子电枢绕组的漏阻抗电压降，端电压将随着电枢电流的增大而降低
- 外特性是下降的。

## — 负载为感性

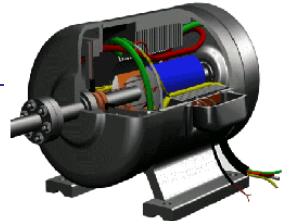
- 电枢反应呈去磁作用
- 空气隙合成磁势将随电枢电流的增加而减小
- 外特性将更为下降。

## — 容性负载时

- 电枢反应呈磁化作用
- 空气隙合成磁势将随电枢电流的增加而增大
- 故外特性可能是上升的。



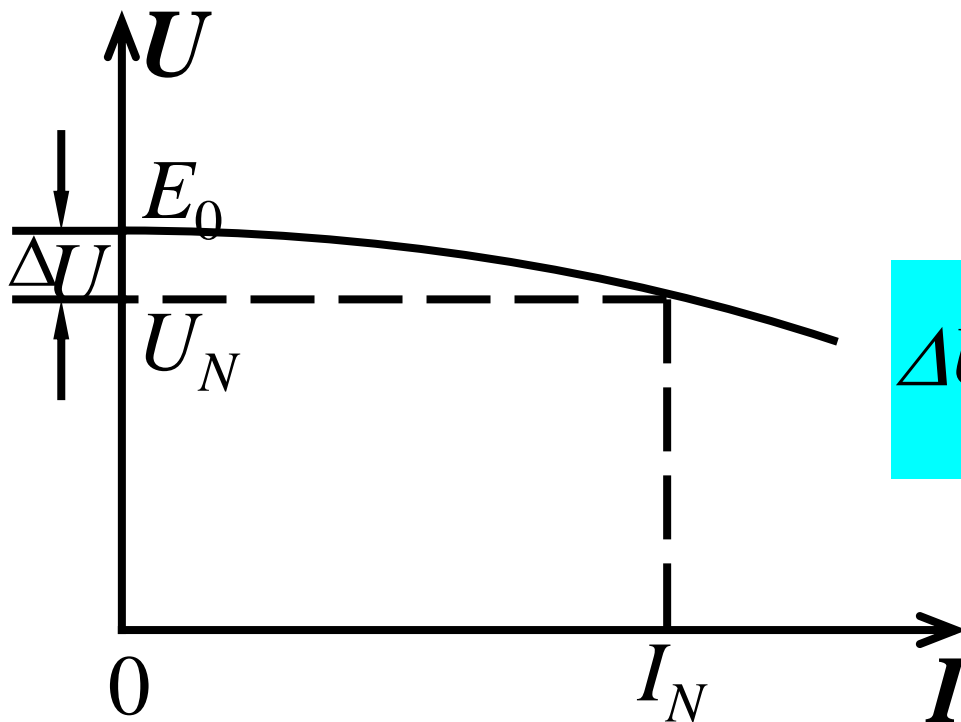




## • 电压变化率

- 当发电机的端电压为额定值，并输出额定负载( $I = I_N, \cos \theta = \cos \theta_N$ ) 时，称为同步发电机的额定工作状态
- 额定工作时的同步发电机，保持其转速及激磁电流不变，而卸去负载，则端电压将发生变化
- 由于额定功率因数总是滞后的，所以卸去负载，呈去磁作用的电枢反应将随电枢电流同时消失，端电压的变化是升高的
- 端电压升高的数值用额定端电压的百分数来表示就称为同步发电机的电压变化率，或称为电压调整率





$$\Delta U \% = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \times 100 \%$$

$I_f = I_{fN}$ ,  $\cos \theta = \cos \theta_N$  时的外特性  $U = f(I)$   
及电压变化率

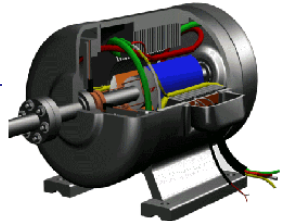




- 为了保证电网电压的质量
  - 现代同步发电机都装备有快速自动电压调节器

$\Delta U$  %最好限制在50%以内，近代凸极式同步发电机的  $\Delta U$  %一般在18%~30%之间，汽轮发电机则由于电枢反应较大， $\Delta U$  % 也就较大通常在30%~48%的范围内。

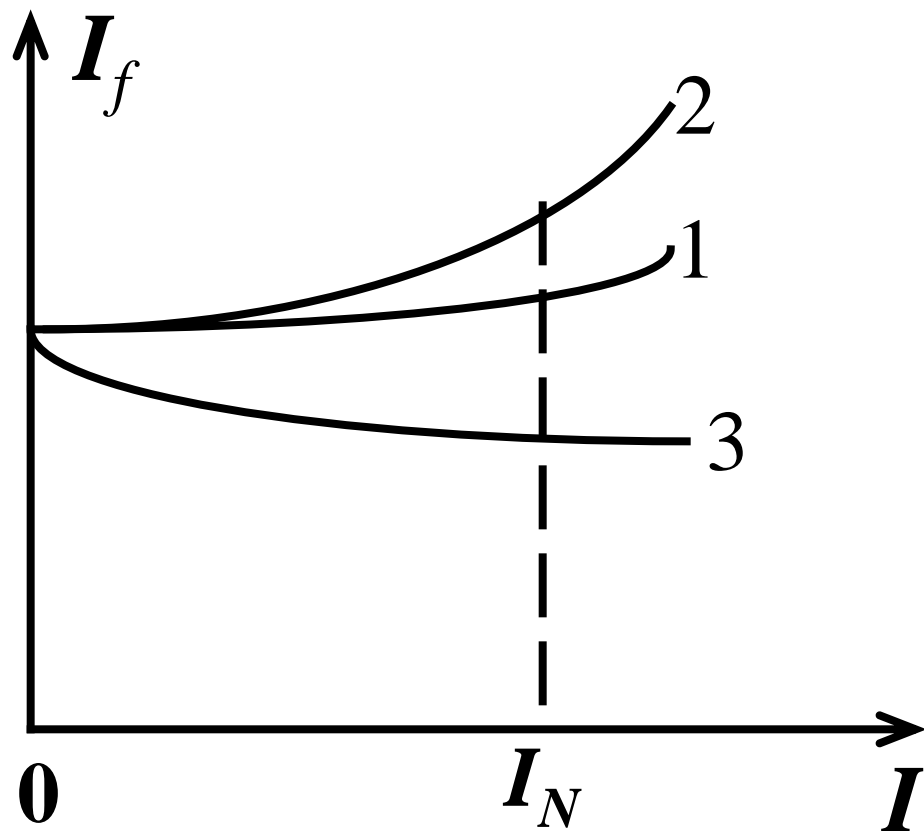




- 调整特性

- 同步发电机正常运行情况下
- $U = cont, \cos \theta = cont$  时

- $I_f = f(I)$



1:  $U = U_N, \cos \theta = 1$

2:  $U = U_N, \cos \theta = 0.8$ (滞后)

3:  $U = U_N, \cos \theta = 0.8$ (超前)





- 效率特性

$$n = n_N, U = U_N, \cos \theta = \cos \theta_N$$

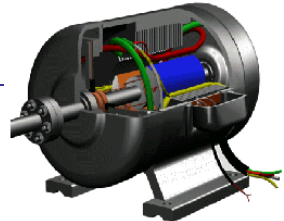
$$\eta = f(P_2)$$

电枢基本铁耗，电枢基本铜耗，励磁损耗，机械损耗，杂散损耗

空气冷却的大型水轮发电机：96%~98.5%

空气冷却的汽轮发电机：94%~97.8%

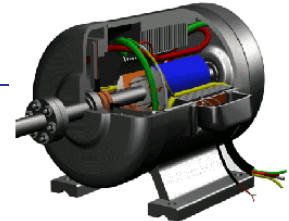




## 求额定励磁电流和电压变化率

- 电势法求电压变化率
  - 设同步电抗为已知，则电压变化率可作相量图求得，这种方法称为电势法。
  - 同步电抗应采用饱和值
- 磁势法求电压变化率
  - 电机制造厂中所实际应用的方法为  
**磁势法**
    - 直接考虑电枢磁势  $F_a$  的作用，而不是把它看作电枢反应电抗来处理，可以把实际的磁路饱和考虑进去
    - 可不考虑隐极式和凸极式电机间的差别





## – 用磁势法求电压变化率时

- 用保梯电抗代替漏抗，以计入负载时的转子漏磁比空载时大的影响

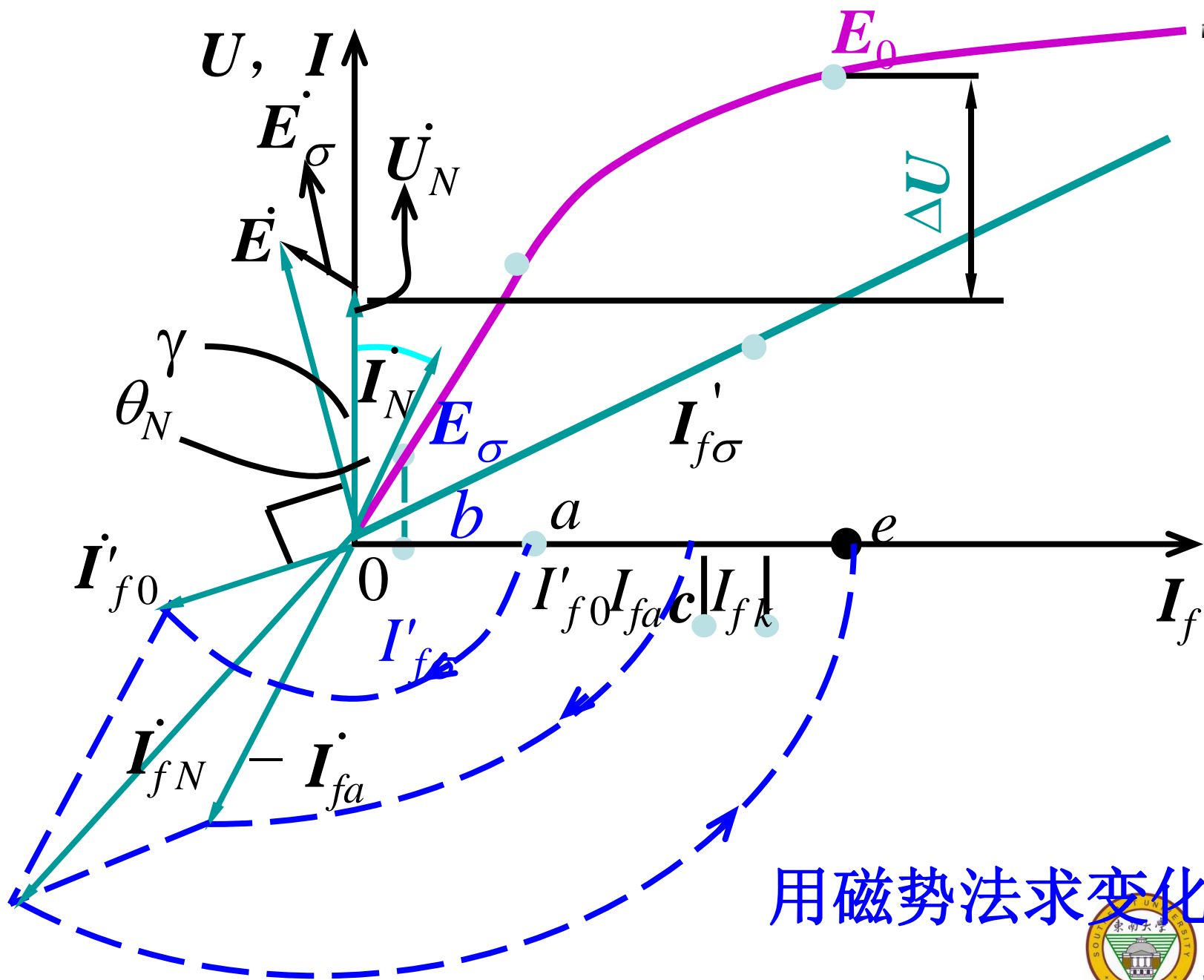
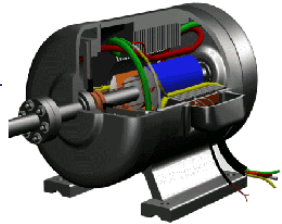
$$\dot{E} = \dot{U}_N + \dot{I}_N r_a + j \dot{I}_N x_\sigma \approx \dot{U}_N + j \dot{I}_N x_p$$

## – 定义

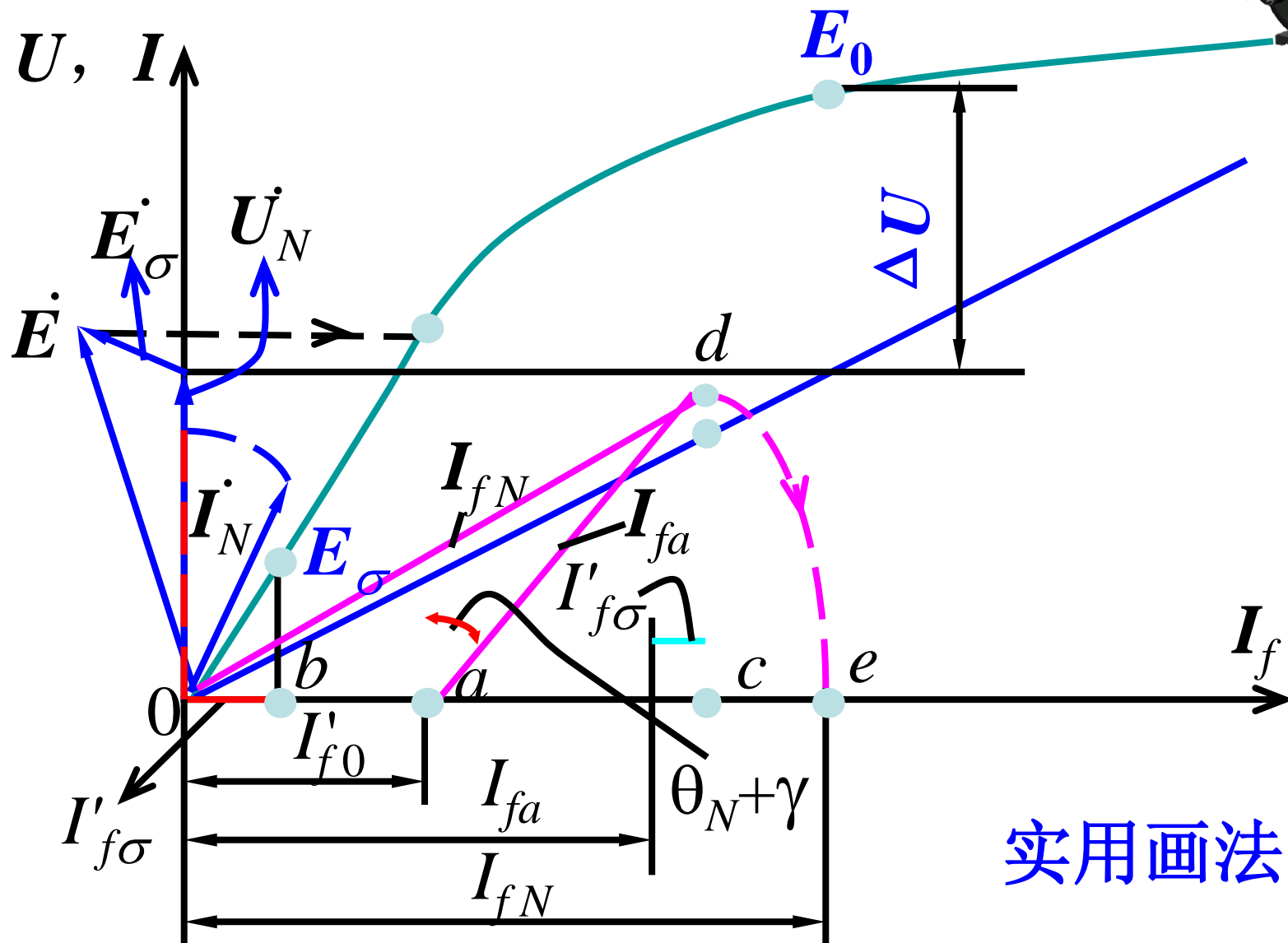
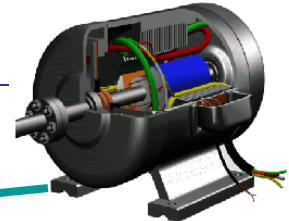
- $\dot{F}'_{f0}$  空气隙合成磁场由转子单独激励时激磁磁势，它所对应的激磁电流为  $\dot{I}'_{f0}$
- $\dot{I}_{fa}$  和电枢反应相当的激磁电流
- $\dot{I}_{fN}$  为额定励磁电流



# 同步发电机的稳态运行特性







实用画法

